

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

HEBERT DOUGLAS PEREIRA

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA REDE SEM FIO  
COGNITIVA *FULL-DUPLEX* COM CAPTAÇÃO DE  
ENERGIA**

CURITIBA

2017

HEBERT DOUGLAS PEREIRA

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA REDE SEM FIO  
COGNITIVA *FULL-DUPLEX* COM CAPTAÇÃO DE  
ENERGIA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná  
Orientador: Prof. Dr. Evelio Martín García Fernández  
Coorientador: Dr. Samuel Baraldi Mafra

CURITIBA

2017

---

P436a

Pereira, Hebert Douglas

Análise de desempenho de uma rede sem fio cognitiva full-duplex com captação de energia /  
Hebert Douglas Pereira. – Curitiba, P436a.

74 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Elétrica, P436a.

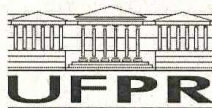
Orientador: Evelio Martín García Fernández.

Coorientador: Samuel Baraldi Mafra.

1. Captação de energia. 2. Rádio cognitivo. 3. Comunicação cooperativa. 4. Nakagami-m.  
5. Seleção de relays. I. Universidade Federal do Paraná. II. García Fernández, Evelio Martín.  
III. Mafra, Samuel Baraldi. IV. Título.

CDD: 621.3

---



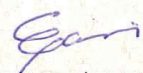
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA  
ELÉTRICA

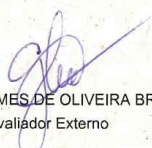
### TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **HEBERT DOUGLAS PEREIRA** intitulada: **Análise de Desempenho de uma Rede sem Fio Cognitiva Full-Duplex com Captação de Energia**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

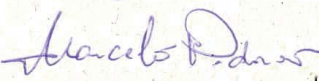
A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

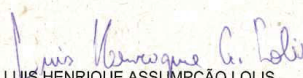
Curitiba, 24 de Novembro de 2017.

  
EVELIO MARTIN GARCIA FERNÁNDEZ  
Presidente da Banca Examinadora

  
GLAUBER GOMES DE OLIVEIRA BRANTE  
Avaliador Externo

  
SAMUEL BARALDI MAFRA  
Avaliador Externo

  
CARLOS MARCELO PEDROSO  
Avaliador Interno

  
LUIS HENRIQUE ASSUMPTÃO LOLIS  
Avaliador Externo

## DEDICATÓRIA

*Ao meu grande amor, minha esposa Kaendra*

*A meus pais Aparício e Ozirema e aos meus irmãos Daython, Erick e Ludyana*

*”Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito.*

*Não sou o que deveria ser, mas graças a Deus, não sou o que era antes”*

*(Marthin Luther King)*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelo fôlego de vida e por ter me dado sabedoria para que pudesse concluir esse projeto.

Agradeço também à minha querida esposa Kaendra, que sempre esteve ao meu lado me incentivando e apoiando incondicionalmente, sem seu apoio e compreensão penso que não conseguiria chegar até aqui.

Agradeço ao meu professor orientador Evelio M. G. Fernández pela confiança e por ter me aceitado como seu orientado mesmo ainda sem nos conhecermos, e ainda por auxiliar e direcionar minhas atividades acadêmicas durante esse período.

Agradeço também ao meu co-orientador Samuel B. Mafra por toda dedicação e auxílio na co-orientação desse trabalho. Foram muitas horas de conversas e pesquisas que foram fundamentais para elaboração dessa dissertação.

Agradeço a professora Dra Kátia L. Silva e ao professor Dr. Mauro H. Gazzani pelas cartas de recomendação, sem as mesmas não poderia dar continuidade a esse projeto.

Agradeço a toda minha família, especialmente meus pais, Aparício e Ozirema, meus irmãos Daython, Erick e Ludyana que mesmo estando longe sempre me apoiaram e incentivaram a continuar nesse propósito. Também aos meus sogros Pedro e Rose pelo apoio. Vocês fazem parte dessa conquista.

Agradeço também ao amigo Onel que no início desse curso me ajudou nos estudos das disciplinas para obtenção dos créditos. Sua ajuda foi de grande importância. Agradeço também a todos os amigos do laboratório LABSISCOM, foram muitas conversas, muitas rizadas e muitas horas de pesquisas e trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da CAPES-DS.

## RESUMO

Nesta dissertação é proposto um sistema cognitivo *full-duplex* com captação de energia. Técnicas de comunicação cooperativa são utilizadas para tentar melhorar o desempenho do sistema em termos de probabilidade de *outage* considerando perfeito conhecimento do canal em todos os nós da rede secundária. Serão derivadas expressões analíticas para alguns cenários particulares propostos. O primeiro cenário é composto por um transmissor primário, uma fonte, um *relay* e um destino. O segundo cenário sendo o mesmo do primeiro, porém com múltiplos *relays* e o terceiro cenário é composto por múltiplos transmissores primários, onde cada um dos nós possuem uma antena. É avaliado também, através de simulação, o cenário com múltiplas antenas na fonte secundária e no *relay*. Os resultados mostraram que o esquema proposto proporciona melhor desempenho quando comparado ao *dual-hop*, *half-duplex* e transmissão direta. É mostrado ainda que, para o cenário com linha de visada entre a rede primária e secundária o desempenho é melhor quando comparado ao cenário onde há linha de visada apenas entre os nós da rede secundária. No cenário com múltiplas antenas na fonte e no *relay*, o desempenho do sistema é superior, comparado aos demais cenários avaliados, devido à maior possibilidade de captação de energia e maiores possibilidades para transmissão das informações.

**Palavras-chave:** Captação de energia, rádio cognitivo, comunicação cooperativa, *full-duplex*, detecção conjunta, Nakagami- $m$ , seleção de *relays*, MIMO.



## ABSTRACT

This dissertation proposes a full-duplex cognitive system with energy harvesting. Cooperative communication techniques are used to try to improve system performance in terms of the outage probability considering perfect knowledge of the channel in all the nodes of the secondary network. We derive analytical expressions for some particular scenarios proposed. The first scenario is composed of a primary transmitter, a source, a relay, and a destination, where each node is single-antenna. The second scenario include multiple relays and the third scenario we consider multiple primary transmitter. It is also evaluated through simulation a scenario with multiple antennas in the secondary source and relay. The results show that the proposed scheme provides better performance when compared to half-duplex, dual-hop and direct transmission. It has also been shown that for the scenario with line of sight between the primary and secondary network, the performance is better when compared to the scenario where there is line of sight only between the nodes of the secondary network. In the scenario with multiple antennas at the source and in the relay, the performance of the system is superior compared to the other scenarios evaluated, due to the possibility of more harvesting energy and more possibilities for information transmission.

**Keywords:** Energy harvesting, cognitive radio, cooperative communication, full-duplex, joint-decoding, Nakagami-m, relay selection, MIMO.



## LISTA DE FIGURAS

2.1	Diagrama esquemático do sistema TS . . . . .	25
2.2	Diagrama esquemático do sistema PS. . . . .	26
3.1	Modelo do sistema: Rede cognitiva cooperativa <i>full-duplex</i> com múltiplos transmissores primários, múltiplos <i>relays</i> e múltiplas antenas na fonte e nos <i>relays</i> , sendo $R_*^n$ o <i>relay</i> selecionado. . . . .	33
3.2	Protocolo HD de captação de energia e transmissão de informação. . . . .	34
3.3	Protocolo FD de captação de energia e transmissão de informação. . . . .	35
3.4	Diagrama de decodificação <i>backward</i> . . . . .	40
3.5	Diagrama esquemático ta técnica TAS/MRC. . . . .	40
3.6	Diagrama esquemático ta técnica TAS/MRC. . . . .	40
3.7	Diagrama esquemático ta técnica seleção de <i>relays</i> . . . . .	41
4.1	Probabilidade de <i>outage</i> dos diferentes esquemas em função de $d_{sr}$ com $\alpha = 0.5$ . . . . .	50
4.2	Probabilidade de <i>outage</i> dos diferentes esquemas em função de $d_{sr}$ com $\alpha = 0.5$ e o transmissor primário na posição (0,0). . . . .	51
4.3	Probabilidade de <i>outage</i> dos diferentes esquemas em função de $\alpha$ com $d_{sr} = 0.5$ e $\mathcal{R} = 1[bpcu]$ . . . . .	52
4.4	Probabilidade de <i>outage</i> dos diferentes esquemas em função da taxa de transmissão esperada $\mathcal{R}$ com $d_{sr} = 0.5$ e $\alpha = 0.5$ . . . . .	53
4.5	Probabilidade de <i>outage</i> em função de $\alpha$ considerando $m_{ps} = m_{pr} = \{1,2,4\}$ demais $m_{sr} = m_{rd} = m_{sd} = m_{pd} = 1$ com $\mathcal{R} = 1[bpcu]$ . . . . .	54

4.6	Probabilidade de <i>outage</i> em função da taxa $\mathcal{R}$ considerando $m_{ps} = m_{pr} = \{1,2,4\}$ demais $m_{sr} = m_{rd} = m_{sd} = m_{pd} = 1$ e $\alpha = 0.5$ . . . . .	55
4.7	Probabilidade de <i>outage</i> em função de $\alpha$ considerando $m_{sr} = m_{rd} = \{1,2,4\}$ demais $m_{ps} = m_{pr} = m_{pd} = m_{sd} = 1$ e $\mathcal{R} = 1$ [bpcu]. . . . .	56
4.8	Probabilidade de <i>outage</i> em função da taxa $\mathcal{R}$ considerando $m_{sr} = m_{rd} = \{1,2,4\}$ demais $m_{ps} = m_{pr} = m_{pd} = m_{sd} = 1$ . . . . .	57
4.9	Probabilidade de <i>outage</i> em função de $\alpha$ com múltiplos <i>relays</i> , considerando $m_{ij} = 1$ e $\mathcal{R} = 1$ [bpcu]. . . . .	58
4.10	Probabilidade de <i>outage</i> em função de $\alpha$ considerando $m_{ij} = 1$ e $\mathcal{R} = 1$ [bpcu]. . . . .	60
4.11	Probabilidade de <i>outage</i> em função de $\alpha$ com múltiplas antenas na fonte secundária e no <i>relay</i> considerando $m_{ij} = 1$ . . . . .	61

## LISTA DE SIGLAS

AF	<i>Amplify-and-Forward</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
CSI	<i>Channel State Information</i>
DF	<i>Decode-and-Forward</i>
DH	<i>Dual-Hop</i>
EH	<i>Energy Harvesting</i>
EH-FDJD	<i>Energy Harvesting Full-Duplex Joint-Decoding</i>
EH-HDJD	<i>Energy Harvesting Half-Duplex Joint Decoding</i>
FD	<i>Full-Duplex</i>
FDJD	<i>Full-Duplex Joint-Decoding</i>
HD	<i>Half-Duplex</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MRC	<i>Maximum Ratio Combining</i>
PS	<i>Power Splitting</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
SC	<i>Selection Combining</i>

SNR	<i>Signal-Noise-Rate</i>
SWIPT	<i>Simultaneous Wireless Information and Power Transfer</i>
TAS	<i>Transmit Antenna Selection</i>
TS	<i>Time Switching</i>
WEH	<i>Wireless Energy Harvesting</i>
WPCN	<i>Wireless-Powered Communication Network</i>
WPT	<i>Wireless Power Transfer</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mathcal{R}$	Taxa de transmissão esperada
$P_l$	$l$ -ésimo transmissor primário
$l$	Índice que representa o número do transmissor primário $1 < l < L$
$S^n$	Fonte secundária com $n$ antenas
$R_u^n$	$u$ relays com $n$ antenas em cada relay
$D$	Destino Secundário
$n$	Índice que representa o número de antenas $1 < n < N$
$u$	Índice que representa o número do relay
$\alpha$	Porcentagem do tempo de carregamento
$T$	Tempo de duração de um quadro
$i$	Índice dos nós $\{p_l, s^n, r_u^n\}$
$j$	Índice dos nós $\{s^n, r_*^n, d\}$
$h_{ij}$	Coeficiente do canal entre o nó $i$ e $j$
$m_{ij}$	Índice Nakagami- $m$ entre o nó $i$ e $j$
$\lambda_{ij}$	Energia média do canal entre o nó $i$ e $j$
$\triangleq$	Igual por definição
$\hat{d}_{ij}$	Distância normalizada entre os nós $i$ e $j$ com relação à distância entre o transmissor primário e o destino secundário

$d_{ij}$	Distância entre o nó $i$ e $j$
$\nu$	Expoente de perda de percurso no espaço livre
$h_{rr}$	Auto interferência causada no <i>relay</i> devido a natureza <i>full-duplex</i>
$\eta$	Eficiência de conversão de energia
$P_p$	Potência de transmissão do primário
$\beta$	Fração de tempo para transmissão da informação nos nós
$\mathcal{O}^{SCH}$	Probabilidade de <i>outage</i> do esquema analisado {DT,EH-HDJD, EH-FDJD}
$\mathcal{I}^{SCH}$	Informação mútua do esquema analisado {DT,EH-HDJD, EH-FDJD}
$\Gamma(\cdot)$	Função Gamma
$U(a,b,c)$	Função confluyente hipergeométrica
$t_c$	Variável de controle do <i>relay</i> para transmissão

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1	Motivação e Justificativa . . . . .	16
1.2	Objetivos . . . . .	20
1.3	Estrutura da Dissertação . . . . .	21
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>23</b>
2.1	Introdução . . . . .	23
2.2	Técnicas de Captação de Energia sem fio . . . . .	23
2.3	Rádio Cognitivo . . . . .	26
2.4	Comunicação Cooperativa . . . . .	28
2.5	Probabilidade de <i>Outage</i> . . . . .	31
2.6	Considerações Finais . . . . .	32
<b>3</b>	<b>CAPTAÇÃO DE ENERGIA EM REDE COGNITIVA COOPERATIVA FULL-DUPLEX</b>	<b>33</b>
3.1	Introdução . . . . .	33
3.2	Modelo do sistema . . . . .	33
3.3	Análise da probabilidade de <i>outage</i> . . . . .	36
3.3.1	Protocolo de Captação de Energia <i>Full-Duplex</i> Cognitivo . . . . .	39
3.3.2	Protocolo de Captação de Energia <i>Half-Duplex</i> Cognitivo . . . . .	46
<b>4</b>	<b>RESULTADOS NUMÉRICOS</b>	<b>48</b>



	15
4.1 Introdução . . . . .	48
4.2 Cenário sem linha de visada . . . . .	49
4.3 Cenário com linha de visada . . . . .	53
4.3.1 Linha de visada entre a rede primária e secundária $m_{ps} = m_{pr} =$ $\{1,2,4\}$ . . . . .	54
4.3.2 Linha de visada entre a fonte e o <i>relay</i> e entre o <i>relay</i> e o destino secundários $m_{sr} = m_{rd} = \{1,2,4\}$ . . . . .	55
4.4 Cenário múltiplos <i>relays</i> . . . . .	57
4.5 Cenário múltiplos transmissores primários . . . . .	59
4.6 Cenário com múltiplas antenas na fonte e no <i>relay</i> . . . . .	60
4.7 Considerações Finais . . . . .	62
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>64</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>66</b>

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 Motivação e Justificativa

Dado o grande avanço tecnológico nas últimas décadas e o crescimento significativo das redes sem fio, várias técnicas têm sido propostas para aumentar a eficiência no uso do espectro de frequências e da energia, dado que ambos são recursos naturais limitados. Dentre essas técnicas, podemos citar captação de energia (EH, do inglês *Energy Harvesting*) e rádio cognitivo.

A eficiência energética tem sido amplamente estudada nos últimos anos, principalmente em dispositivos de comunicação sem fio. Dentro desse cenário destacam-se as redes de sensores sem fio (WSN, do inglês *Wireless Sensor Network*), que são redes compostas por um grande número de sensores de baixo custo, alimentados por baterias de baixa capacidade. Devido à grande quantidade desses dispositivos e às dificuldades de manutenção, o custo se torna muito alto, ou em alguns casos, até mesmo impraticável (AKYILDIZ et al., 2002).

O processo de extração de energia do ambiente ao redor foi proposto como um método alternativo para fornecer energia e auto-suficiência nas redes de comunicação com restrições de fornecimento de energia. Inicialmente tentou-se integrar os dispositivos sem fio com capacidade de EH através de fontes de energias renováveis, como solar, eólica, térmica, vibração, calor corporal, entre outras. Porém essas fontes de energias naturais dependem das condições climáticas, fato que torna o sistema limitado a determinados locais e ambientes específicos, não conseguindo assim garantir boa Qualidade de Serviço (QoS, do inglês *Quality of Service*) na rede, tornando a técnica de EH até mesmo ineficiente para muitas aplicações e localidades (SUDEVALAYAM; KULKARNI, 2011).

Surge então o conceito de transmissão de informação e energia por rádio frequência (RF, do inglês *Radio Frequency*) de forma conjunta que foi demonstrado por Varshney em (VARSHNEY, 2008). Esse conceito tem atraído grande atenção nos últimos anos, visto que pode fornecer uma auto-suficiência de energia para sistemas com baixa potência de comunicação. O processo de transferência sem fio de energia (WPT, do inglês *Wireless Power Transfer*) é feito a partir de um transmissor de RF dedicado. Já a captação de energia em redes sem fio (WEH, do inglês *Wireless Energy Harvesting*) é feita através de qualquer sinal de RF que esteja ao alcance do dispositivo receptor.

Assim, aplicando a técnica de WEH nas redes sem fio, surge então o conceito de redes sem fio de comunicação de informação e energia (WPCN, do inglês *Wireless-Powered Communication Network*), onde os dispositivos sem fio podem processar os sinais de RF irradiados por um transmissor dedicado ou não, do qual extrai informação e energia simultaneamente. A energia captada é utilizada para recarregar suas baterias e/ou transmitir suas informações (FOULADGAR; SIMEONE, 2012; KRIKIDIS et al., 2012; ISHIBASHI et al., 2012; ZHOU et al., 2013). Através de um processo de transferência simultânea sem fio de energia e informação (SWIPT, do inglês *Simultaneous Wireless Information and Power Transfer*) (ZHANG; HO, 2013) demonstram a vantagem em transmitir informação e energia de forma eficiente simultaneamente, garantindo assim uma total autonomia da rede, com um bom desempenho, diminuindo os custos com manutenção sem necessidade de quaisquer alterações nos transmissores.

Neste cenário, o conceito WEH veio de encontro às necessidades das WSN. Espera-se que o processo de WEH possa prolongar o tempo de duração das baterias dos dispositivos dessas redes, ou até mesmo garantir uma total autonomia dos mesmos (CHENG et al., 2013; HE et al., 2013). Além disso, trouxe um novo olhar sobre o futuro das comunicações entre objetos sem a intervenção humana, que são chamados Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) (KAMALINEJAD et al., 2015), pois essas redes se encaixam perfeitamente nos requisitos das WPCN por seus dispositivos possuírem baixo consumo de potência na ordem de  $\mu\text{W}$  (HE et al., 2013; CHENG et al., 2013).

Na busca por melhorar a eficiência da rede, surge o conceito de comunicação cooperativa (LANEMAN et al., 2004), onde nós *relays* são utilizados para encaminhar a informação para o destino através de dois protocolos principais: amplifica e encaminha (AF, do inglês *Amplify-and-Forward*) onde o *relay* apenas amplifica o sinal recebido, e decodifica e encaminha (DF, do inglês *Decode-and-Forward*) onde o *relay* somente re-envia a informação se conseguir decodificá-la corretamente. Os nós *relays* fazem uso de dois protocolos para transmissão/encaminhamento da informação: *Half-Duplex* (HD) e *Full-Duplex* (FD). Em (NASIR et al., 2013) é proposta uma rede cooperativa com captação de energia e o *relay* operando no modo AF. A rede possui uma fonte um *relay* e um destino, sendo que o *relay* não possui fonte de energia própria e toda a energia necessária é captada do sinal enviado pela fonte.

Aliada a eficiência energética, está a eficiência espectral. Com o objetivo de desenvolver técnicas mais eficientes para o uso do espectro de frequência, surgiu o conceito de rádio cognitivo, introduzido por (MITOLA; MAGUIRE, 1999), no qual foi apresentado uma nova forma de alocação no espectro de frequência, onde os usuários não licenciados (secundários ou cognitivos) podiam transmitir concorrentemente com os usuários licenciados (primários), desde que não interferissem na comunicação dos usuários licenciados.

O paradigma de rádio cognitivo tem sido amplamente estudado tendo seus conceitos fortemente estabelecidos na literatura em comunicações ponto-a-ponto. Mais recentemente o conceito de rádio cognitivo começou a ser abordado nas redes de comunicação cooperativa (LEE; YENER, 2006; LEE et al., 2011). Em (LEE; YENER, 2006) a rede secundária usa o protocolo *interweave* e é composta por um cluster contendo vários *relays*, no qual apenas um é selecionado para cooperar com a rede primária. O *relay* só será selecionado se conseguir decodificar a informação corretamente e ainda encontrar um espaço no espectro de frequência para fazer a transmissão. Foi mostrado que se cada nó conseguir decodificar corretamente a informação e encontrar espaço no espectro de frequência, consegue-se atingir a diversidade total do sistema. Também é aplicado um esquema de cooperação entre os clusters afim de atingir a total diversidade do sistema.

Já em (LEE et al., 2011) a rede secundária é composta por uma fonte, múltiplos *relays* e um destino, no qual a fonte e os *relays* têm suas potências de transmissão limitados pelo destino primário. Foi mostrado que a probabilidade de *outage* é maior na rede secundária do que na rede primária devido às restrições de interferência do primário, no qual foi quantizado essa diferença. Foi mostrado também que a distância entre a rede primária e secundária afeta diretamente o desempenho da rede secundária, além disso, a probabilidade de *outage* diminui com o aumento do número de *relays*, atingindo a mesma diversidade total alcançada na redes convencionais.

Empregando o conceito de rádio cognitivo e EH conjuntamente, alguns autores mostraram a viabilidade de se ter uma rede de rádio cognitivo com captação de energia, ou seja, a energia necessária para funcionamento de um ou mais dispositivos da rede é captada através dos sinais transmitidos pelos transmissores primários, coexistindo perfeitamente e respeitando os limites de interferência da rede primária (LEE et al., 2013; HOANG et al., 2015; WANG et al., 2016; AMER et al., 2016).

Em (ZHONG et al., 2015) é proposta uma rede cognitiva com seleção de *relays* FD para melhorar o desempenho, em termos de probabilidade de *outage*, em relação a esquemas operando em HD. Por sua vez, em (MAFRA et al., 2015) os autores apresentam o esquema FDJD (FDJD, do inglês *Full-Duplex Joint-Decoding*) onde é considerado o enlace direto entre fonte e destino da rede secundária. É mostrado que o FDJD apresenta melhor desempenho em relação a esquemas tradicionais. Em (HU et al., 2016), um esquema de captação de energia em uma rede cooperativa cognitiva é analisado, onde a rede secundária coopera com a primária através do protocolo cognitivo *overlay*, e o transmissor secundário opera em modo FD com captação de energia, carregando suas baterias a partir do sinal de RF do primário e da auto-interferência.

Em (WANG et al., 2016) uma rede de rádio cognitivo com captação de energia é proposta, composta por uma fonte e um destino na rede primária, e na rede secundária um *relay* e um destino que captam energia no modo PS. De forma similar, uma rede cognitiva com captação de energia é proposta em (LIU et al., 2016) onde a fonte e o *relay*

captam energia para funcionamento a partir de múltiplos transmissores dentro da área de alcance. O *relay* opera em modo AF e não há comunicação direta entre a fonte e o destino por conta de condições adversas de propagação em larga escala.

Frente aos trabalhos apresentados enxergamos a necessidade de analisar uma rede cognitiva cooperativa em modo FD, para isso, vamos analisar um cenário, semelhante ao cenário apresentado em (LIU et al., 2016) em uma rede cooperativa operando em *full-duplex* e considerando o enlace entre fonte e destino secundários como informação útil. Propomos assim uma rede cognitiva cooperativa FD com captação de energia que chamaremos de (EH-FDJD, do inglês *Energy Harvesting Full-Duplex Joint-Decoding*), onde iremos usar a detecção conjunta no destino conforme apresentado em (KHAFAGY et al., 2013; MAFRA et al., 2015). Consideramos que a fonte e o *relay* da rede secundária não possuem fonte de energia própria e carregam suas baterias através da energia captada da rede primária, da mesma forma apresentada por (LIU et al., 2016). Estenderemos a análise para um cenário semelhante ao apresentado por (YEOH et al., 2016) com múltiplos transmissores primários e múltiplas antenas na fonte e no *relay* e uma única antena no destino, porém não levaremos em conta os múltiplos destinos primários, visto que os mesmos serão considerados estando a uma distância grande de tal forma que não irá causar nenhuma restrição no secundário.

O desempenho em termos de probabilidade de *outage* do esquema proposto será comparado com esquemas com captação de energia cognitivos com transmissão direta, salto duplo (DH, do inglês *Dual-Hop*) e com cooperação em modo HD. Serão considerados vários fatores que podem impactar o desempenho do sistema, tais como, a interferência do primário e a auto-interferência devido à operação FD no *relay*.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral da dissertação é avaliar o desempenho de uma rede sem fio com captação de energia em sistemas de rádio cognitivo cooperativos com *relay* operando em

modo *full-duplex*.

Os objetivos específicos desta dissertação são:

- Caracterizar matematicamente a comunicação de uma rede cognitiva cooperativa operando em modo FD, levando-se em consideração as interferências causadas pelos primários;
- Avaliar através de simulações a exatidão das expressões matemáticas obtidas e o desempenho do sistema;
- Avaliar outras técnicas para melhorar o desempenho do sistema, tais como MIMO, múltiplos *relays* e também múltiplos transmissores primários.

### 1.3 Estrutura da Dissertação

O restante da dissertação está organizado da seguinte forma: no Capítulo 2 são apresentadas as duas principais técnicas de captação de energia por rádio frequência na literatura científica, alguns conceitos fundamentais relacionados com comunicação cooperativa e rádio cognitivo. No Capítulo 3 é caracterizado um sistema cognitivo *full-duplex* com captação de energia com o auxílio da técnica de comunicação cooperativa. No Capítulo 4 são discutidos os resultados numéricos e as simulações, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais e propostas de trabalhos futuros.

Por fim, listamos abaixo as submissões feitas até o momento. A primeira é fortemente ligada ao tema desta dissertação, sendo um cenário particular proposto, onde alguns dos seus resultados foram usados aqui. A segunda explora tema codificação de rede, porém com um cenário semelhante, o que também proporcionou o uso de algumas conclusões nessa dissertação.



1. PEREIRA, H. D., MAFRA, S. B., e FERNÁNDEZ, E. M. G., “Análise de Desempenho de uma Rede Cognitiva Full-Duplex com Captação de Energia”, **XXXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS (SBrT)**, São Pedro-SP, Brasil, Setembro, 2017.
2. MAFRA, S. B., FERNÁNDEZ, E. M. G., MONTEJO-SÁNCHEZ, S., e PEREIRA, H. D. “Performance Analysis of Energy Constrained Cognitive Full-Duplex Generalized Network Coding Scheme”, **XXXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS (SBrT)**, São Pedro, Brasil, Setembro, 2017.

## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 2.1 Introdução

Neste capítulo serão detalhadas as principais técnicas de WEH e rádio cognitivo abordadas na literatura científica e também como elas são empregadas conjuntamente. Ainda será discutida a técnica de comunicação cooperativa nas redes rádio cognitivo com EH e os benefícios proporcionados por ela.

#### 2.2 Técnicas de Captação de Energia sem fio

As técnicas de WEH possibilitam que um dispositivo de comunicação sem fio use o sinal de RF recebido de fontes transmissoras dentro da área de alcance para converter em energia, e assim poder alimentar seus circuitos internos e recarregar suas baterias para uso futuro (VYAS et al., 2013; ZHOU et al., 2013). Em (ZHOU et al., 2013) são investigados três casos de captação de energia com duas arquiteturas de receptores: informação integrada onde o conversor RF-DC é colocado na banda de RF e informação separada onde o conversor é colocado na banda base. O trabalho apresenta a região da taxa de energia (R-E) e o compromisso taxa-energia para as duas arquiteturas. Ainda em (ZHOU et al., 2013) foi demonstrado que o receptor integrado atinge melhor desempenho quando a quantidade de energia desejada é maior. Frente aos benefícios proporcionados pela técnica WEH, tem havido um crescente interesse nessa área, tanto da indústria quanto no meio acadêmico na última década (KRIKIDIS et al., 2012; VISSER; VULLERS, 2013; HUANG; LAU, 2014; KIM et al., 2014; LIU et al., 2016; ATAPATTU; EVANS, 2016; LIU et al., 2017).

Alguns trabalhos nos últimos cinco anos mostraram através de experimentos práticos a quantidade de energia que pode ser captada, sendo que essa quantidade de energia varia de acordo com a frequência do sinal, potência de transmissão e distância entre o ponto de captação e o transmissor. De acordo com (LU et al., 2014) alguns experimentos práticos apresentaram eficiência superior a 0.4% com uma potência de incidência de -40 dBm, superior a 18.2% com -20 dBm e mais de 50% com -5dBm conforme mostrado na Tabela 2.1 adaptada de (LU et al., 2014) .

Tabela 2.1: Dados experimentais de captação de energia por RF com diversos tipos de transmissores adaptado de (LU et al., 2014)

Fonte	Pot.	Freq. (MHz)	Distância	Pot. Captada
Transmissor de RF isotrópico (LE et al., 2006)	4 W	902-928	15m	5.5 $\mu$ W
Transmissor de RF isotrópico (STOOPMAN et al., 2013)	1.78 W	868	25m	2.3 $\mu$ W
Transmissor de RF isotrópico (STOOPMAN et al., 2014)	1.78 W	868	27m	2 $\mu$ W
Transmissor TX91501 (ZUNGERU et al., 2012)	3W	915	5m	189 $\mu$ W
Transmissor TX91501 (ZUNGERU et al., 2012)	3W	915	11m	1 $\mu$ W
Torre da King-TV (SAMPLE et al., 2013)	960 kW	674-680	4.1 km	60 $\mu$ W

Observa-se ainda na Tabela 2.1, que a quantidade de energia captada é da ordem de poucos  $\mu$ W, valores ainda considerados baixos no cenário atual de desenvolvimento tecnológico, porém espera-se que essa eficiência seja ampliada em um futuro próximo, visto a evolução tecnológica atual (LU et al., 2014).

Vários outros trabalhos apresentaram experimentos práticos, como o caso apresentado por Vyas em (VYAS et al., 2012, 2013) no qual fazem captação de energia do sinal da banda de TV digital e analógica, tendo potência de transmissão  $P_t = 10 \sim 100$  kW e as medidas foram realizadas a uma distância de 6,5 km conforme pode ser visto na Tabela 2.2 adaptada de (VYAS et al., 2012). Os valores práticos encontrados nos vários experimentos mostrados nas Tabelas 2.1 e 2.2, confirmam a viabilidade da técnica de EH, mostrando ser muito promissora, principalmente para as WSN, onde os dispositivos operam com níveis

Tabela 2.2: Dados experimentais de captação de energia por RF em frequências de TV analógica e digital no centro de Tokyo com distância de 6,5 km, adaptado de (VYAS et al., 2012)

Frequência	Aplicação	Medidas Intensidade Campo Elétrico $ E $ (V/m)	Potência Captada Dipolo $P_{in}$ $\mu$ W
560 - 580 MHz	TV Digital	0.44 - 0.57	18.54 - 30.76
540 - 560 MHz	TV Digital	0.62 - 0.79	39.02 - 64.76
520 - 540 MHz	TV Digital	0.44 - 0.57	21.44 - 35.58
510 - 520 MHz	TV Digital	0.007 - 0.01	0.007 - 0.011
494 MHz	TV Analógica	0.26 - 0.34	8.88 - 14.74
487 MHz	TV Analógica	0.62 - 0.80	49.77 - 82.60
480 MHz	TV Analógica	0.62 - 0.80	51.23 - 85.03

muito baixos de potência, na ordem de poucos  $\mu$  W.

Ainda não é possível na prática extrair energia e informação ao mesmo tempo do sinal recebido, dado que após o processo de conversão do sinal de RF em energia, o conteúdo da informação é destruído. Atualmente só é possível usar o sinal de RF para conversão em energia ou utilizá-lo para decodificação da informação (ZHOU et al., 2012). Há na literatura várias técnicas que possibilitam um sistema sem fio com captação de energia para as redes SWIPT, dentre elas as duas principais e mais utilizadas na literatura são:

- Multiplexação no tempo (TS, do inglês *Time Switching*) mostrado na Figura 2.1, na qual em um intervalo de tempo específico o sinal recebido é destinado pra captação de energia e no restante do intervalo para decodificação da informação (ZHOU et al., 2012; NASIR et al., 2013);

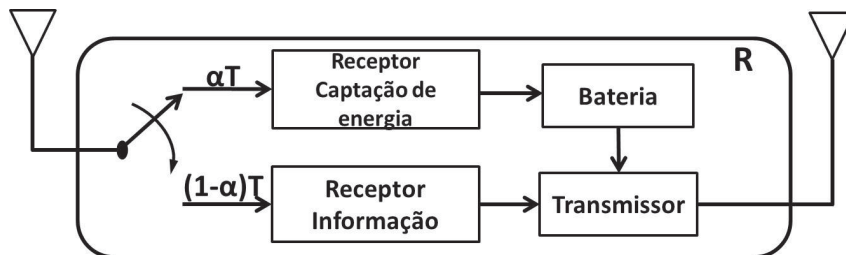


Figura 2.1: Diagrama esquemático do sistema TS

- Divisão de potência (PS, do inglês *Power Splitting*) mostrado na Figura 2.2, onde o sinal recebido é dividido em dois, no qual uma porcentagem é destinada para o

circuito de captação de energia, e o restante é destinada para a decodificação da informação (ZHOU et al., 2012; NASIR et al., 2013);

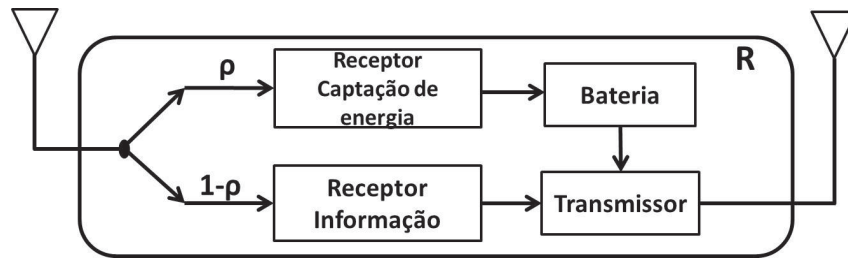


Figura 2.2: Diagrama esquemático do sistema PS.

Para essa dissertação foi adotado o modelo de captação de energia de multiplexação no tempo TS, por ser mais simples de implementar e também por possuir menos componentes que acabam gerando ruído ao sistema (ZHANG; HO, 2013) como no caso do modelo PS, onde são inseridos dispositivos eletrônicos para fazer a divisão da potência. Ainda vale ressaltar que o protocolo PS é mais recomendado para os casos onde a informação flui na mesma direção que a energia a ser captada. No caso dessa dissertação a energia não flui na mesma direção e ainda possui dois dispositivos que fazem captação de energia, que são a fonte e o *relay*, não sendo necessário fazer nova captação de energia para transmissão das informações dentro de um determinado período de tempo.

## 2.3 Rádio Cognitivo

Rádio cognitivo trouxe uma nova visão em relação ao uso do espectro de frequência, possibilitando uma alocação mais eficiente, onde os usuários não licenciados podem compartilhar o mesmo espectro de frequência dos usuários primários. De acordo com (HAYKIN, 2005), rádio cognitivo é um sistema de comunicação sem fio, inteligente, que faz análise do ambiente a fim de conhecer as características do canal de comunicação, para que possa fazer modificações nos seus parâmetros de funcionamento, como potência de transmissão e frequência de portadora, com o objetivo de ter uma comunicação altamente confiável e uma utilização mais eficiente do espectro de rádio.

O rádio cognitivo possui três protocolos principais de operação (GOLDSMITH et al., 2009):

- *Underlay* - Onde os usuários secundários podem transmitir simultaneamente com os usuários primários, desde que a potência de transmissão dos usuários secundários fique abaixo do limite de interferência estabelecido pelos usuários primários;
- *Overlay* - Onde o usuário secundário precisa ter conhecimento total da rede primária, ele pode transmitir de forma concorrente e ainda ajudar na comunicação da rede primária;
- *Interweave* - Os usuários secundários fazem uma varredura em todo o espectro de frequência para saber se está sendo utilizado, caso não esteja, ele usa esse canal para fazer sua transmissão, assim não gera interferência nos usuários primários. Caso o usuário primário comece a transmitir nessa mesma faixa de frequência, o usuário secundário interrompe a transmissão e faz uma nova varredura procurando uma nova frequência disponível para transmissão.

Os primeiros trabalhos envolvendo o conceito de rádio cognitivo consideraram canais com a presença de ruído branco gaussiano (AWGN, do inglês *Additive White Gaussian Noise*) conforme apresentado em (GASTPAR, 2007), onde foi avaliado a capacidade dos canais e as restrições de interferência eram impostas na saída do canal. Em outra abordagem (GHASEMI; SOUSA, 2007) analisaram a capacidade do canal em canais com desvanecimento e com limite de interferência na transmissão. Foi mostrado um ganho significativo na rede secundária em ambientes de desvanecimento profundo em comparação ao canal sem desvanecimento.

Dentre os protocolos citados acima, o *underlay* é o protocolo que mais se encaixa em um cenário real, dado que a transmissão secundária ocorre de forma simultânea com a rede primária e não necessita de nenhum conhecimento de informação dos canais da rede primária, sendo esse o motivo de adotá-lo nesta dissertação.

## 2.4 Comunicação Cooperativa

Como os canais sem fio sofrem degradação do seu sinal com a presença de interferências, desvanecimento e sombreamento, o conceito de comunicação cooperativa introduzido por (LANEMAN et al., 2004), trouxe uma nova perspectiva sobre as comunicações sem fio ponto-a-ponto. A comunicação cooperativa propicia diversidade espacial, mesmo em cenários com apenas uma antena em cada nó. As comunicações cooperativas melhoram a eficiência da rede, conseqüentemente, melhorando a capacidade, confiabilidade e diminuindo os efeitos de desvanecimento, além de proporcionar um (MIMO, do inglês *Multiple Input Multiple Output*) virtual ao sistema (NOSRATINIA et al., 2004).

A comunicação cooperativa acontece em duas fases, *broadcast* e cooperação, na fase de *broadcast* a fonte transmite sua informação para o destino e para o *relay*. Na fase de cooperação, o *relay* encaminha a informação para o destino, assim duas versões da informação podem chegar ao destino, garantindo a diversidade do sistema. Para encaminhar a informação para o destino o *relay* faz uso de dois protocolos:

- Amplifica e encaminha (AF), onde os nós *relays* apenas amplificam e encaminham a informação para o destino, sem fazer qualquer processamento no sinal. Esse modelo é mais simples de ser implementado porém possui desempenho pior, pois o ruído também é amplificado.
- Decodifica e encaminha (DF), onde os nós *relays* só encaminham a informação se conseguir decodificá-la corretamente.

Com relação ao modo de transmissão, o *relay* pode ser classificado em duas categorias:

- *Half-Duplex* (HD) onde a transmissão e recepção ocorrem em intervalos de tempo diferentes;
- *Full-Duplex* (FD) onde a transmissão e recepção ocorrem, simultaneamente, e na mesma frequência. Isto provoca a introdução de auto-interferência no *relay* devido



à dificuldade na prática em garantir um isolamento perfeito entre os sinais transmitidos e recebidos (KWON et al., 2010; DUARTE et al., 2012; RIIHONEN et al., 2011b). Mesmo com o uso de técnicas avançadas de processamentos de sinais juntamente com técnicas de isolamento de antenas, a auto-interferência não pode ser totalmente eliminada, apenas minimizada conforme mostrado em (DUARTE et al., 2012). Diante disso, ainda deve-se considerar a auto-interferência nas análises (KWON et al., 2010; RIIHONEN et al., 2011a; SABHARWAL et al., 2014).

No nó destino, com a recepção dos dois sinais diferentes, os mesmos podem ser combinados ou comparados para verificar qual sinal apresenta melhor relação sinal ruído (SNR, do inglês *Signal-Noise-Rate*). Assim, as principais técnicas de combinação de sinais são (GOLDSMITH, 2005):

- Combinação seletiva (SC, do inglês *Selection Combining*): o receptor compara os sinais recebidos e escolhe o sinal que apresenta a maior SNR;
- Combinação de máxima taxa (MRC, do inglês *Maximum Ratio Combining*): o sinal resultante é uma combinação ponderada dos sinais recebidos para maximizar a SNR de saída, ou seja, a SNR de saída é a soma das SNRs de entrada.

Em (NASIR et al., 2013) é proposta uma rede cooperativa com captação de energia nos modos PS e TS e o *relay* HD operando no modo AF. A rede possui uma fonte um *relay* e um destino, sendo que o *relay* não possui fonte de energia própria, toda a energia necessária é captada do sinal enviado pela fonte. Nessa análise o esquema TS apresenta um desempenho superior em relação ao PS. Em (ZHONG et al., 2015) é proposta uma rede cognitiva com seleção de *relays* FD para melhorar o desempenho, em termos de probabilidade de *outage*, em relação a esquemas operando em modo HD. Foi mostrado que a presença de múltiplos *relays* possibilita alcançar uma seleção ótima, onde é alcançada a probabilidade de *outage* mínima dentro de uma determinada faixa de SNR.

Em (HU et al., 2016) um esquema de captação de energia em uma rede cognitiva é analisado, onde a rede secundária coopera com a primária através do protocolo *overlay*, o

transmissor secundário opera em modo FD com captação de energia usando o protocolo PS, carregando suas baterias a partir do sinal de RF do primário e da auto-interferência. Foi mostrado que o protocolo de captação de energia com auto-reciclagem proposto supera os modelos PS e TS comparados. Já em (LIU et al., 2016) uma rede de rádio cognitivo com captação de energia HD é proposta, composta por múltiplos transmissores e destinos na rede primária, na rede secundária uma fonte, um *relay* e um destino, no qual a fonte e o *relay* captam energia da rede primária através das técnicas TS e PS. Foi mostrado que quando o primário está em uma região mais próxima da fonte secundária e consequentemente mais longe do *relay* e do destino, a probabilidade de *outage* melhora. Além disso, foi mostrado que para um número grande de transmissores primários, o efeito prejudicial da interferência no secundário supera os benefícios da captação de energia produzidos por eles.

Por sua vez, em (MAFRA et al., 2015) os autores apresentam o esquema FDJD (do inglês: *Full-Duplex Joint-Decoding*) onde o enlace direto entre fonte e destino da rede secundária é considerado. O *relay* utiliza o protocolo DF seletivo e a técnica detecção conjunta JD é aplicada no destino para decodificar os sinais recebidos da fonte e do *relay*. Ainda em (MAFRA et al., 2015) é mostrado que o FDJD apresenta melhor desempenho em relação com esquemas tradicionais que desconsideram o efeito do sinal do enlace direto, ou o consideram como interferência, no destino.

As técnicas de combinação de sinais citadas acima são para tratamento das informações no receptor, porém vale ressaltar a técnica de seleção da antena de transmissão (TAS, do inglês *Transmit Antenna Selection*), onde o transmissor seleciona a antena com melhores condições para transmissão das informações. Vários trabalhos empregando essa técnica foram publicados (THOEN et al., 2001; ANH et al., 2016; YEOH et al., 2016; MEN et al., 2016). Em (THOEN et al., 2001) foi proposto um sistema MIMO ponto a ponto que atinge a ordem de diversidade igual ao produto do número de antenas transmissoras e receptoras. Em (ANH et al., 2016) por sua vez, é estudada uma rede SWIPT composta por um par fonte-destino com múltiplas antenas e um *relay* com apenas uma

antena que precisa captar energia do sinal para transmissão das informações onde a comunicação é feita em duas etapas: fonte-*relay* onde é aplicada a técnica TAS e *relay*-destino que usa a técnica MRC. Foi demonstrado que a presença de múltiplas antenas na fonte e no destino melhoram significativamente o desempenho da rede e para melhorar ainda mais esse desempenho, basta aumentar o número de antenas no destino.

Em (YEOH et al., 2016) é avaliado o desempenho de uma rede cognitiva MIMO onde a rede primária é composta por múltiplos transmissores e múltiplos destinos, e a rede secundária por uma fonte, um *relay* e um destino com múltiplas antenas em cada nó. Foi mostrado que a técnica TAS/MRC apresenta melhor desempenho em termos de probabilidade de *outage* do que TAS/SC, apesar de que ambos atingem a mesma ordem de diversidade do sistema. Já em (MEN et al., 2016) é apresentada uma rede com captação de energia em modo *half-duplex*, porém não cognitiva, onde apenas o *relay* faz captação de energia através do modo PS. A rede é composta por uma fonte, múltiplos *relays* e um destino sendo que cada dispositivo da rede possui múltiplas antenas. O esquema foi analisado com o objetivo de melhorar o desempenho em termos de probabilidade de *outage* da rede aplicando técnicas de seleção de *relays* e antenas (TAS). Foi mostrado que a pior posição para o *relay* é no ponto médio entre a fonte e o destino, devido à técnica de captação de energia PS. Também foi demonstrado que quanto maior o desvanecimento, maior precisa ser a taxa de potência destinada a conversão de energia.

## 2.5 Probabilidade de *Outage*

Assumindo largura de banda unitária e entradas gaussianas, um evento de *outage* ocorre quando a informação mútua do canal  $\log_2(1 + |h|^2 SNR)$  (GOLDSMITH, 2005) é menor do que a taxa de transmissão esperada  $\mathcal{R}$  em bits por uso do canal (bpcu), sendo que a informação mútua é dada em função do ganho do canal que é caracterizado pela variável aleatória  $|h|^2$ .

Assim em um canal com desvanecimento quase-estático a probabilidade de *outage* é

definida por

$$\mathcal{O} = \Pr \left[ \log_2(1 + |h|^2 SNR) < \mathcal{R} \right], \quad (2.1)$$

onde  $\Pr[\cdot]$  é a probabilidade do evento acontecer.

Nesta dissertação será analisado a probabilidade de *outage* dos esquemas *full-duplex*, *half-duplex* e comunicação direta.

## 2.6 Considerações Finais

Neste capítulo, foram apresentadas as principais técnicas de captação de energia em redes sem fio, rádio cognitivo e comunicação cooperativa. Foram citados os conceitos de informação mútua e probabilidade de *outage* que será a métrica para avaliar o desempenho. No próximo capítulo será analisado o desempenho de uma rede cognitiva cooperativa *full-duplex* com captação de energia em termos de probabilidade de *outage*.

## CAPÍTULO 3

### CAPTAÇÃO DE ENERGIA EM REDE COGNITIVA COOPERATIVA FULL-DUPLEX

#### 3.1 Introdução

Este capítulo apresenta uma rede cognitiva cooperativa *full-duplex* com captação de energia através da técnica TS. O sistema é avaliado a partir da métrica de probabilidade de *outage*. São utilizadas técnicas de comunicação cooperativa visando atingir melhor desempenho do sistema.

#### 3.2 Modelo do sistema

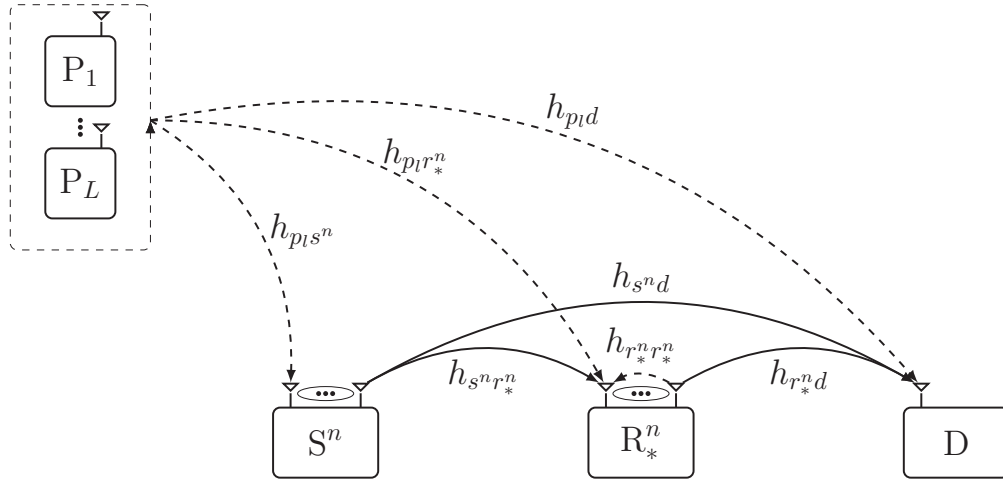


Figura 3.1: Modelo do sistema: Rede cognitiva cooperativa *full-duplex* com múltiplos transmissores primários, múltiplos *relays* e múltiplas antenas na fonte e nos *relays*, sendo  $R_*^n$  o *relay* selecionado.

A Figura 3.1 mostra a topologia da rede, onde  $P_l$  representa o  $l$ -ésimo transmissor primário  $1 < l < L$ . A rede secundária é composta por uma fonte  $S^n$ , múltiplos *relays*  $R_u^n$

e um destino D, onde  $n$  é o índice que representa o número de antenas, sendo  $1 < n < N$ ,  $u$  o índice que representa o número do *relay*, com  $1 < u < U$ .

Consideramos nesta dissertação, que o destino possui fonte de energia própria, já a fonte e o *relay* precisam realizar captação de energia do sinal transmitido pelos múltiplos transmissores primários <sup>1</sup>. Devido à proximidade dos múltiplos transmissores primários com a rede secundária, o sistema será caracterizado por um cenário limitado por interferência. Assume-se que os múltiplos destinos primários estão a uma distância grande de S e R, tal que a potência transmitida por S e R não causará nenhuma interferência nos múltiplos destinos primários, sendo assim serão desconsiderados nas análises.

Para transmissão das informações serão considerados cenários HD e FD conforme mostrado nas Figuras 3.2 e 3.3, respectivamente. Em ambos cenários, no primeiro intervalo de tempo de duração  $\alpha T$ , S e R captam energia do sinais dos transmissores primários, onde  $\alpha \in [0,1]$  é a porcentagem do tempo de carregamento e  $T$  o tempo de duração de um quadro. Após a captação de energia, no cenário HD (Figura 3.2) o restante do tempo é dividido em dois intervalos de igual duração  $(1 - \alpha)\beta T$  com  $\beta = \frac{1}{2}$ . No primeiro intervalo a informação é enviada via *broadcast* para R e D e no segundo intervalo R encaminha a informação recebida de S para D. No cenário FD o protocolo considerado é mostrado na Figura 3.3, onde considera-se  $\beta = 1$  dado que a transmissão da informação de S para R e de R para D acontecem no mesmo intervalo de tempo. Neste caso, a transmissão e recepção simultâneas provoca auto-interferência no *relay*.

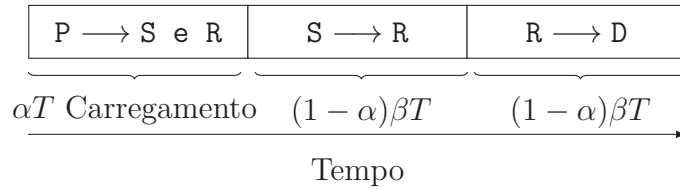


Figura 3.2: Protocolo HD de captação de energia e transmissão de informação.

Será considerado desvanecimento quase estático em todos os enlaces, sendo o coeficiente de canal entre o transmissor  $i$  e o destino  $j$  denotado por  $h_{ij}$ , com  $i \in \{p_l, s^n, r_u^n\}$  e

---

<sup>1</sup>Assume-se que os nós possuem uma bateria capaz de mantê-los em funcionamento, visto que se considerarmos que toda energia captada for utilizada para funcionamento e transmissão das informações, o problema se torna muito difícil de modelar conforme mostrado em (LUO et al., 2013).

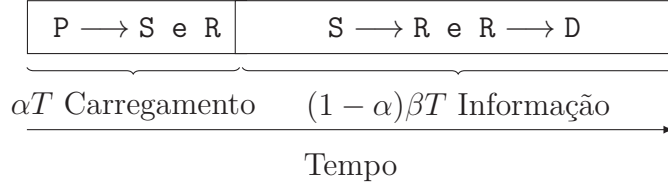


Figura 3.3: Protocolo FD de captação de energia e transmissão de informação.

$j \in \{s^n, r_u^n, d\}$ , onde  $p_l$  representa o  $l$ -ésimo transmissor primário,  $s^n$  é a  $n$ -ésima antena da fonte  $S$  e  $r_u^n$  é a  $n$ -ésima antena do  $u$ -ésimo *relay*, sendo que  $h_{ij}$  segue uma distribuição Nakagami- $m$ <sup>2</sup> com parâmetro  $m_{ij}$  e energia média  $\lambda_{ij}$ . Quando for considerado apenas um transmissor primário, uma antena em cada nó e apenas um *relay*, os índices são suprimidos e a notação de  $i$  e  $j$  é expressa por  $i \in \{p, s, r\}$  e  $j \in \{s, r, d\}$ .

Seguindo a descrição do cenário acima, o ganho de potência médio do canal é dado por  $\lambda_{ij} \triangleq \mathbb{E}[|h_{ij}|^2] \triangleq \hat{d}_{ij}^{-v}$  e  $\hat{d}_{ij} = \frac{d_{ij}}{d_{pd}}$ , onde  $\hat{d}_{ij}$  é a distância normalizada entre o nó  $i$  e  $j$  com relação à distância entre o transmissor primário e o destino secundário,  $d_{ij}$  é a distância entre os nós  $i$  e  $j$  e  $v$  é o expoente de perda de percurso ( $v \geq 2$ ). Observe que  $h_{rr}$  representa a auto-interferência residual no *relay full-duplex* após a aplicação de técnicas de cancelamento de interferência conforme descrito em (DUARTE et al., 2012). Considera-se também que a componente principal é reduzida pela isolamento das antenas do *relay*, assim  $\lambda_{rr}$  é dominada apenas pela componente de dispersão.

A energia recebida tanto na fonte  $S$  quanto no *relay* selecionado  $R_*$  é dada, respectivamente, por

$$E_s = \eta \alpha T P_p \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N |h_{p_l s^n}|^2, \quad (3.1)$$

$$E_{r_*} = \eta \alpha T P_p \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N |h_{p_l r_*^n}|^2, \quad (3.2)$$

onde  $\eta$  é a eficiência de conversão de energia,  $P_p$  é a potência de transmissão do primário e  $|h_{p_l s^n}|^2$  é o ganho de potência do canal entre os transmissores primários e a fonte

---

<sup>2</sup>A distribuição Nakagami- $m$  é uma distribuição geral que aplica a vários tipos de desvanecimento. Para o caso da distribuição Rayleigh por exemplo, corresponde ao índice  $m = 1$ . Para os casos onde o  $m > 1$  há linha de visada entre o nó transmissor e receptor.



secundária. A potência de transmissão da fonte e do *relay* selecionado é dada por

$$P_s = \frac{E_s}{(1-\alpha)\beta T} = \frac{\eta\alpha \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N P_p |h_{p_l s^n}|^2}{(1-\alpha)\beta} = \mathcal{K} P_p \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N |h_{p_l s^n}|^2 \quad (3.3)$$

e

$$P_{r_*} = \frac{E_{r_*}}{(1-\alpha)\beta T} = \frac{\eta\alpha \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N P_p |h_{p_l r_*^n}|^2}{(1-\alpha)\beta} = \mathcal{K} P_p \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N |h_{p_l r_*^n}|^2, \quad (3.4)$$

onde  $\mathcal{K} = \frac{\eta\alpha}{(1-\alpha)\beta}$  e  $\beta$  representa a fração do tempo utilizada pelos nós para transmitir as informações.

### 3.3 Análise da probabilidade de *outage*

Neste trabalho consideramos como métrica de avaliação de desempenho a probabilidade de *outage*, que é definida como a probabilidade de falha na comunicação em um determinado enlace de comunicação. Será analisada a probabilidade de *outage* dos esquemas *full-duplex* (EH-FDJD), *half-duplex* (EH-HDJD, do inglês *Energy Harvesting Half-Duplex Joint Decoding*) e comunicação direta (DT), para facilitar a notação usaremos o termo probabilidade de *outage* do esquema  $\mathcal{O}^{\mathcal{SCH}}$  onde  $\mathcal{SCH} \in \{\text{EH-FDJD}, \text{EH-HDJD}, \text{DT}\}$ , para analisar a probabilidade de *outage* faremos uso da informação mútua entre os canais e também usaremos a definição informação mútua do esquema  $\mathcal{I}^{\mathcal{SCH}}$ .

O critério adotado tanto para seleção de *relays*, quanto para o TAS será através do conhecimento perfeito do canal (CSI, do inglês *Channel Side Information*) que será obtido através de sinais pilotos conforme em (BLAGOJEVIC; IVANIS, 2012; KHAN et al., 2013; MEN et al., 2016). Nesta dissertação, é assumido conhecimento perfeito dos canais em todos os dispositivos da rede secundária. Assim, a informação mútua no enlace  $S \rightarrow D$  pode ser escrita como

$$\mathcal{I}_{sd}^{\text{DT}} = \beta(1-\alpha) \log_2 \left( 1 + \frac{P_s |h_{s^n d}|^2}{P_p \sum_{l=1}^L |h_{p_l d}|^2} \right). \quad (3.5)$$

Substituindo o valor de  $P_s$  (3.3) em (3.5) a informação mútua entre fonte e destino é dada por

$$\mathcal{I}_{sd}^{\text{DT}} = \beta(1 - \alpha) \log_2 \left( 1 + \frac{\mathcal{K} P_p \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N |h_{p_l s^n}|^2 |h_{s^n d}^*|^2}{P_p \sum_{l=1}^L |h_{p_l d}|^2} \right). \quad (3.6)$$

Pode-se perceber que a informação mútua não depende da potência do primário, pois a mesma potência que é utilizada para captação de energia em (3.3) é a que gera interferência em (3.5), sendo assim, os termos são simplificados.

Supondo largura de banda unitária, a probabilidade de *outage* do enlace direto entre fonte e destino secundários pode ser escrita como

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{sd}^{\text{DT}} &= \Pr \left[ \mathcal{I}_{sd}^{\text{DT}} < \mathcal{R} \right] \\ &= \Pr \left[ \log_2 \left( 1 + \frac{\mathcal{K} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N |h_{p_l s^n}|^2 |h_{s^n d}^*|^2}{\sum_{l=1}^L |h_{p_l d}|^2} \right) < \frac{\mathcal{R}}{\beta(1 - \alpha)} \right], \end{aligned} \quad (3.7)$$

onde  $\mathcal{R}$  é a taxa de transmissão esperada. Para o cenário com apenas um transmissor primário, uma fonte secundária, um *relay* e um destino onde todos os elementos possuem uma única antena, a probabilidade de *outage* é dada por

$$\mathcal{O}_{sd}^{\text{DT}} = \Pr \left[ \log_2 \left( 1 + \frac{\mathcal{K} |h_{ps}|^2 |h_{sd}|^2}{|h_{pd}|^2} \right) < \frac{\mathcal{R}}{\beta(1 - \alpha)} \right]. \quad (3.8)$$

Em (MAFRA et al., 2017) foi apresentada uma expressão fechada para  $\mathcal{O}_{sd}^{\text{DT}}$  que é dada por

$$\mathcal{O}_{sd}^{\text{DT}} = \begin{cases} \mathcal{Z}_{md} e^{\mathcal{Z}_{md}} \text{E}_n(m_{kj}, \mathcal{Z}_{md}), & \text{para } m_{kj} \geq 1 \text{ e } m_{pk} = m_{pj} = 1 \\ 1 - \frac{\Gamma(m_{pk} + m_{pj}) U(m_{pj}, 1 - m_{pk}, \frac{\mathcal{Z}_d m_{pk}}{m_{pj}})}{\Gamma(m_{pk})}, & \text{para } m_{kj} = 1, m_{pk} \geq 1 \text{ e } m_{pj} \geq 1. \end{cases} \quad (3.9)$$

onde  $\text{E}_n(n, x) = \int_1^\infty \frac{e^{-xt}}{t^n} dt$  é a função exponencial integral (ABRAMOWITZ, 1974, Eq. (5.1.4)),  $\Gamma(\cdot)$  é a função Gamma,  $U(a, b, c)$  é a função confluyente hipergeométrica descrita

em (GRADSHTEYN; RYZHIK, 2007, Eq. 9.211.4) e  $\mathcal{Z}_{md}$  é uma constante dada por:

$$\mathcal{Z}_{md} = \frac{\left(2^{\frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)}} - 1\right) m_{sd} \lambda_{pd}}{\mathcal{K} \lambda_{ps} \lambda_{sd}}. \quad (3.10)$$

Para o cenário com desvanecimento Rayleigh a probabilidade de *outage* em (3.9) se reduz a

$$\mathcal{O}_{sd}^{DT} = \mathcal{Z}_d e^{\mathcal{Z}_d} E_1(\mathcal{Z}_d), \quad (3.11)$$

onde

$$\mathcal{Z}_d = \frac{\left(2^{\frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)}} - 1\right) \lambda_{pd}}{\mathcal{K} \lambda_{ps} \lambda_{sd}} \quad (3.12)$$

e  $E_1(x) = \int_1^\infty \frac{e^{-xt}}{t} dt$  conforme demonstrado em (MORITZ et al., 2015).

**Teorema 1.** *Para o cenário com múltiplos transmissores primários e considerando desvanecimento Nakagami-m com índice  $m = 1$  (Rayleigh), a probabilidade de outage do enlace  $S \rightarrow D$  é expressa por*

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{sd}^{DT} &= \Pr \left[ \log_2 \left( 1 + \frac{\mathcal{K} \sum_{l=1}^L |h_{p_l s}|^2 |h_{sd}|^2}{\sum_{l=1}^L |h_{p_l d}|^2} \right) < \frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)} \right] \\ &= 1 - \frac{\Gamma(2L) U \left( L, 1 - L, \frac{\left(2^{\frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)}} - 1\right) \lambda_{pd}}{\mathcal{K} \lambda_{ps} \lambda_{sd}} \right)}{\Gamma(L)}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

*Demonstração.* Para o cenário com múltiplos transmissores primários, uma fonte, um *relay* e um destino, onde cada um dos nós possuem uma única antena sem linha de visada entre os enlaces, ou seja, desvanecimento Rayleigh a equação (3.7) se reduz a

$$\mathcal{O}_{sd}^{DT} = \Pr \left[ \log_2 \left( 1 + \frac{\mathcal{K} \sum_{l=1}^L |h_{p_l s}|^2 |h_{sd}|^2}{\sum_{l=1}^L |h_{p_l d}|^2} \right) < \frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)} \right]. \quad (3.14)$$

Para resolver (3.14), define-se  $Y_j = \sum_{l=1}^L |h_{plj}|^2$ , onde  $Y_j$  representa a soma de  $L$  variáveis aleatórias exponenciais independentes, e essa soma segue uma distribuição Gamma, cuja função densidade de probabilidade é dada por  $f_{Y_j}(Y_j) = \frac{Y_j^{L-1} e^{-\frac{Y_j}{\lambda_{ps}}}}{\Gamma(L)(\lambda_{ps})^L}$  e a função cumulativa de probabilidade de  $Y_j$  é dada por  $F_{Y_j}(Y_j) = \frac{\Gamma(L, \frac{Y_j}{\lambda_{ps}})}{\Gamma(L)}$  (GOLDSMITH, 2005). Assim também a variável  $X_d = |h_{sd}|^2$  que possui uma distribuição exponencial, a função densidade e cumulativa de probabilidade podem ser expressas, respectivamente, por  $f_{X_d}(X_d) = \frac{e^{-\frac{X_d}{\lambda_{sd}}}}{\lambda_{sd}}$  e  $F_{X_d}(X_d) = 1 - e^{-\frac{X_d}{\lambda_{sd}}}$  (GOLDSMITH, 2005). Assim a equação (3.14) é expressa por

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{sd}^{DT} &= \Pr \left[ \log_2 \left( 1 + \frac{\mathcal{K}Y_s X_d}{Y_d} \right) < \frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)} \right] \\ &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{Y_d(2^{\frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)}} - 1)}{Y_s}} f_{Y_s}(Y_s) f_{Y_d}(Y_d) f_{X_d}(X_d) dX_d dY_s dY_d, \end{aligned} \quad (3.15)$$

sendo que  $f_{Y_s}(Y_s)$  é a função densidade de probabilidade de  $Y_s$ ,  $f_{Y_d}(Y_d)$  é a função densidade de probabilidade de  $Y_d$  e  $f_{X_d}(X_d)$  é a função densidade de probabilidade de  $X_d$ .

Assim, com algumas manipulações e o auxílio do software Wolfram Mathematica, a solução de (3.15), pode ser expressa por (3.13).

□

### 3.3.1 Protocolo de Captação de Energia *Full-Duplex* Cognitivo

No esquema de captação de energia *full-duplex* com detecção conjunta EH-FDJD ocorre a decodificação *backward* ou decodificação para trás, conforme Figura 3.4. O processo de decodificação *backward* é um processo iterativo dependente da decodificação dos blocos, cuja finalidade é combinar as informações recebidas da fonte e do *relay*, através de técnicas avançadas de decodificação e de conhecimento adquiridos dos quadros previamente recebidos (KHAFAGY et al., 2013; MAFRA et al., 2015).

Usando a técnica TAS/MRC, conforme esquematizada na Figura 3.5, para o enlace  $S \rightarrow R_*$  é selecionada a antena que proporciona melhor ganho para esse enlace, assim,

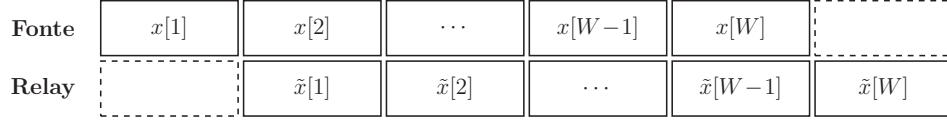


Figura 3.4: Diagrama de decodificação *backward*

a transmissão para o destino é feita pela mesma antena selecionada no enlace  $S \rightarrow R_*$ , mesmo que o ganho do canal entre o enlace  $S \rightarrow D$  não seja o melhor entre todas as antenas transmissoras.

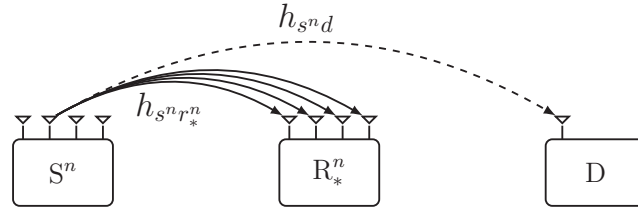


Figura 3.5: Diagrama esquemático da técnica TAS/MRC.

Assim a informação mútua para o enlace  $S \rightarrow R_*$  pode ser calculada como

$$\mathcal{I}_{sr_*}^{FD} = \beta(1 - \alpha) \log_2 \left( 1 + \frac{P_s \|h_{s^n r_*^n}^*\|^2}{P_p \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N |h_{p_l r_*^n}|^2 + P_{r_*} |h_{r_*^n r_*^n}|^2} \right), \quad (3.16)$$

onde  $\|\cdot\|$  é a norma Euclidiana. Em (3.16)

$$\|h_{s^n r_*^n}^*\|^2 = \max_{n \in \{1, \dots, N\}} \left\{ \|h_{s^n r_*^1}, \dots, h_{s^n r_*^N}\|^2 \right\}, \quad (3.17)$$

é o valor que maximiza a transmissão no enlace  $S \rightarrow R_*$  considerando todas as antenas tanto da fonte quanto do *relay* conforme (YEOH et al., 2016). Já a informação mútua no

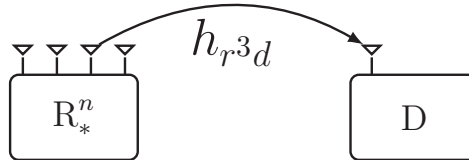


Figura 3.6: Diagrama esquemático da técnica TAS/MRC.

enlace  $R_* \rightarrow D$  aplicando a técnica TAS no *relay*, conforme esquematizado na Figura 3.6

e fazendo detecção conjunta no destino, é dada por

$$\mathcal{I}_{r_*d}^{FD} = \beta(1 - \alpha) \log_2 \left( 1 + \frac{P_s |h_{s^n d}^*|^2 + P_{r_*} |h_{r_*d}^*|^2}{P_p \sum_{l=1}^L |h_{p_l d}|^2} \right), \quad (3.18)$$

onde  $|h_{r_*d}^*|^2 = \arg \max_{n \in \{1, \dots, N\}} |h_{r_*d}^n|^2$  é o valor máximo do ganho de potência dentre todos os canais entre o *relay* selecionado e o destino.

Nesta dissertação será adotado o protocolo de seleção de *relays* distribuído, modo reativo, onde o *relay* escolhido é aquele que maximiza a comunicação entre o *relay* e o destino, ou seja, aquele que conseguir decodificar a informação e possuir melhor ganho de canal entre R e D será o escolhido para transmitir a informação conforme proposto em (BLETSAS et al., 2005, 2007), assim o *relay* selecionado é expresso por

$$R_*^n = \arg \max_{u \in \{1, \dots, U\}} \left( |h_{r_u d}^n|^2 \right). \quad (3.19)$$

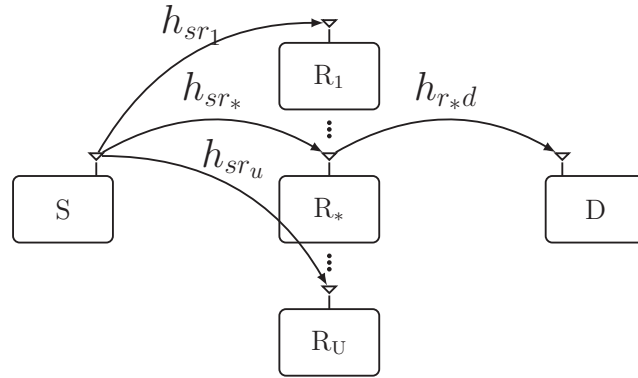


Figura 3.7: Diagrama esquemático da técnica de seleção de *relays*.

Para a seleção de *relays* distribuído, conforme mostrado na Figura 3.7, cada *relay* espera um tempo proporcional a uma variável de controle  $t_c$  que é dado em função do ganho do canal antes de fazer sua transmissão, sendo  $t_c \sim \frac{1}{|h_{r_u d}^n|^2} + \varphi$ . Como o ganho dos canais podem apresentar valores idênticos e assim ocorrer colisões, é inserida a variável aleatória Gaussiana  $\varphi$  para evitar tais colisões. A variável  $\varphi$  possui média zero, variância  $\sigma_\varphi^2$  e seu valor é muito pequeno comparado ao ganho do canal  $|h_{r_u d}^n|^2$ .

Pode-se notar que os sinais vindo de S e R são tratados como informação útil no

destino, contudo também é possível perceber que a auto-interferência em R é levada em consideração de acordo com (3.16). Dessa forma, a probabilidade de *outage* do esquema proposto EH-FDJD pode ser escrita como:

$$\mathcal{O}^{\text{EH-FDJD}} = \mathcal{O}_{sd}^{FD}(\mathcal{O}_{sr}^{FD})^U + (1 - (\mathcal{O}_{sr}^{FD})^U)\mathcal{O}_{rd}^{FD}. \quad (3.20)$$

Para se obter uma expressão fechada para (3.20) é necessário resolver os termos individualmente. O valor de  $\mathcal{O}_{sd}^{FD}$  pode ser obtido através de (3.8) com  $\beta = 1$ . A probabilidade de *outage* para o enlace  $S \rightarrow R_*$ , é definida como  $\mathcal{O}_{sr_*}^{FD} = \Pr[\mathcal{I}_{sr_*} < \mathcal{R}]$  e pode ser calculada encontrando primeiramente os valores de  $P_s$  em (3.3) e  $P_{r_*}$  em (3.4) e em seguida substituindo em (3.16),

$$\mathcal{O}_{sr_*}^{FD} = \Pr \left[ \log_2 \left( 1 + \frac{\mathcal{K} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N |h_{pls^n}|^2 \|h_{s^n r_*}^*\|^2}{\sum_{l=1}^L |h_{plr_*}^n|^2 (1 + \mathcal{K} \sum_{n=1}^N |h_{r_* r_*}^n|^2)} \right) < \frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)} \right]. \quad (3.21)$$

Por fim, a probabilidade de *outage* no enlace  $R_* \rightarrow D$  é definida como  $\mathcal{O}_{r_*d}^{FD} = \Pr[\mathcal{I}_{r_*d} < \mathcal{R}]$  e pode ser obtida encontrando primeiramente os valores de  $P_s$  em (3.3) e  $P_{r_*}$  em (3.4) e substituindo em (3.18)

$$\mathcal{O}_{r_*d}^{FD} = \Pr \left[ \log_2 \left( 1 + \frac{\mathcal{K} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \left( |h_{pls^n}|^2 |h_{s^n d}^*|^2 + |h_{plr_*}^n|^2 |h_{r_* d}^*|^2 \right)}{\sum_{l=1}^L |h_{pld}|^2} \right) < \frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)} \right]. \quad (3.22)$$

Pode ser observado em (3.21) e (3.22) que a informação mútua não depende da potência do primário, dado que a mesma potência utilizada na captação de energia é a que irá causar interferência, assim os termos são simplificados.

Para o cenário com apenas um transmissor primário, uma fonte secundária, um *relay* e um destino, cada um com uma única antena, a informação mútua no enlace  $S \rightarrow R$  em (3.21) e  $R \rightarrow D$  em (3.22) se reduz a

$$\mathcal{O}_{sr}^{FD} = \Pr \left[ \log_2 \left( 1 + \mathcal{K} \left( \frac{|h_{ps}|^2 |h_{sr}|^2}{|h_{pr}|^2 (1 + \mathcal{K} |h_{rr}|^2)} \right) \right) < \frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)} \right], \quad (3.23)$$

$$\mathcal{O}_{rd}^{FD} = \Pr \left[ \log_2 \left( 1 + \mathcal{K} \left( \frac{|h_{ps}|^2 |h_{sd}|^2 + |h_{pr}|^2 |h_{rd}|^2}{|h_{pd}|^2} \right) \right) < \frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)} \right]. \quad (3.24)$$

A auto-interferência em (3.23), representada por  $h_{rr}$ , pode ser vista como uma versão atenuada da interferência do primário no *relay* e pode ser desprezada <sup>3</sup>. Portanto, a probabilidade  $\mathcal{O}_{sr}^{FD}$  pode ser reescrita como

$$\mathcal{O}_{sr}^{FD} = \Pr \left[ \log_2 \left( 1 + \mathcal{K} \left( \frac{|h_{ps}|^2 |h_{sr}|^2}{|h_{pr}|^2} \right) \right) < \frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)} \right]. \quad (3.25)$$

Desta forma, a probabilidade de *outage* no enlace  $S \rightarrow R$  pode ser encontrada de forma similar a probabilidade de *outage* no enlace  $S \rightarrow D$  em (3.8),

$$\mathcal{O}_{sr}^{FD} = \begin{cases} \mathcal{Z}_{mr} e^{\mathcal{Z}_{mr}} E_n(m_{kj}, \mathcal{Z}_{mr}), & \text{para } m_{kj} \geq 1 \text{ e } m_{pk} = m_{pj} = 1 \\ 1 - \frac{\Gamma(m_{pk} + m_{pj}) U(m_{pj}, 1 - m_{pk}, \frac{\mathcal{Z}_{mr} m_{pk}}{m_{pj}})}{\Gamma(m_{pk})}, & \text{para } m_{kj} = 1, m_{pk} \geq 1 \text{ e } m_{pj} \geq 1. \end{cases} \quad (3.26)$$

onde  $\mathcal{Z}_{mr}$  é uma constante dada por:

$$\mathcal{Z}_{mr} = \frac{\left( 2^{\frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)}} - 1 \right) m_{sr} \lambda_{pr}}{\mathcal{K} \lambda_{ps} \lambda_{sr}}. \quad (3.27)$$

Considerando o cenário com desvanecimento Rayleigh a probabilidade de *outage* em (3.26) é a mesma encontrada em (3.11) apenas alterando o valor da constante  $\mathcal{Z}_d$  em (3.12) por  $\mathcal{Z}_r$  que é definida por

$$\mathcal{Z}_r = \frac{\left( 2^{\frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)}} - 1 \right) \lambda_{pr}}{\mathcal{K} \lambda_{ps} \lambda_{sr}}, \quad (3.28)$$

conforme demonstrado em (MORITZ et al., 2015).

Para o cenário com múltiplos transmissores primários, uma fonte, um *relay* e um

---

<sup>3</sup>Conforme mostrado em (DUARTE et al., 2012; ALVES et al., 2013; MAFRA et al., 2015), a auto-interferência pode ser atenuada através de técnicas de cancelamento de interferência para valores residuais na ordem de  $\lambda_{rr} < 10^{-3}$ , dessa forma podemos dizer que a auto-interferência é uma versão reduzida da potência do primário, sendo considerada aproximadamente mil vezes menor. Assim considera-se que a parcela da auto-interferência é muito menor que a interferência da rede primária e assim esse termo pode ser desprezado.



destino, onde cada um dos nós possui uma única antena e considerando desvanecimento Rayleigh e desconsiderando a auto-interferência. A probabilidade de *outage* do enlace  $S \rightarrow R$  representado pela equação (3.21) se reduz a

$$\mathcal{O}_{sr}^{FD} = \Pr \left[ \log_2 \left( 1 + \frac{\mathcal{K} \sum_{l=1}^L |h_{p_{ls}}|^2 |h_{sr}|^2}{\sum_{l=1}^L |h_{p_{lr}}|^2} \right) < \frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)} \right]. \quad (3.29)$$

Seguindo o mesmo raciocínio para resolver a probabilidade de *outage* no enlace  $S \rightarrow D$  mostrado no Teorema 1, a probabilidade de *outage* do enlace  $S \rightarrow R$  dada pela equação (3.29) pode ser expressa da mesma forma que (3.13), apenas substituindo  $\lambda_{pd}$  por  $\lambda_{pr}$  e  $\lambda_{sd}$  por  $\lambda_{sr}$ , assim a probabilidade de *outage* do enlace  $S \rightarrow R$  é expressa por

$$\mathcal{O}_{sr}^{FD} = 1 - \frac{\Gamma(2L) U \left( L, 1-L, \frac{\left( 2^{\frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)}} - 1 \right) \lambda_{pr}}{\mathcal{K} \lambda_{ps} \lambda_{sr}} \right)}{\Gamma(L)}. \quad (3.30)$$

**Teorema 2.** A probabilidade de *outage*  $\mathcal{O}_{rd}^{FD}$  em (3.24) pode ser aproximada como

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{rd}^{FD} &= \Pr \left[ \log_2 \left( 1 + \mathcal{K} \left( \frac{|h_{ps}|^2 |h_{sd}|^2 + |h_{pr}|^2 |h_{rd}|^2}{|h_{pd}|^2} \right) \right) < \frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)} \right] \\ &\approx 2^{-\xi_s - \xi_r} \varrho_s^{-\xi_s} \varrho_r^{-\xi_r} (X \lambda_{pd})^{\frac{\xi_s + \xi_r}{2}} U \left( \frac{\xi_s}{2}, 0.5, \frac{X \lambda_{pd}}{4 \varrho_s^2} \right) U \left( \frac{\xi_r}{2}, 0.5, \frac{X \lambda_{pd}}{4 \varrho_r^2} \right), \end{aligned} \quad (3.31)$$

onde  $X = \frac{\left( 2^{\frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)}} - 1 \right)}{\mathcal{K}}$  e os termos  $\xi_s$ ,  $\xi_r$ ,  $\varrho_s$  e  $\varrho_r$  são descritos como:

$$\xi_s = \left( \frac{\Gamma(m_{ps}) \Gamma(m_{ps} + 1) \Gamma(m_{sd}) \Gamma(m_{sd} + 1)}{\Gamma(m_{ps} + 0.5)^2 + \Gamma(m_{sd} + 0.5)^2} - 1 \right)^{-1}, \quad (3.32)$$

$$\xi_r = \left( \frac{\Gamma(m_{pr}) \Gamma(m_{pr} + 1) \Gamma(m_{rd}) \Gamma(m_{rd} + 1)}{\Gamma(m_{pr} + 0.5)^2 + \Gamma(m_{rd} + 0.5)^2} - 1 \right)^{-1}, \quad (3.33)$$

$$\varrho_s = \sqrt{\frac{\lambda_{ps} \lambda_{sd}}{m_{ps} m_{sd}}} \frac{\Gamma(m_{ps} + 0.5) \Gamma(m_{sd} + 0.5)}{\Gamma(m_{ps}) \Gamma(m_{sd})} \frac{1}{\xi_s}, \quad (3.34)$$

$$\varrho_r = \sqrt{\frac{\lambda_{pr} \lambda_{rd}}{m_{pr} m_{rd}}} \frac{\Gamma(m_{pr} + 0.5) \Gamma(m_{rd} + 0.5)}{\Gamma(m_{pr}) \Gamma(m_{rd})} \frac{1}{\xi_r}. \quad (3.35)$$

*Demonstração.* A fim de encontrar a probabilidade de *outage* para o enlace  $R \rightarrow D$  em (3.31), nos auxiliaremos do resultado apresentado em (ALVES et al., 2013) para aproximar o produto de duas variáveis aleatórias Nakagami- $m$  ( $Z_k = h_{pk}h_{kd}$ ) por uma variável Gamma ( $\Lambda_k \sim \Gamma(\xi_k, \varrho_k)$ ), onde  $k \in \{s, r\}$ , cujos parâmetros  $\xi_k$  e  $\varrho_k$  podem ser estimados através do método gerador de momentos descrito em (Papoulis; Pillai, 2002). Para isso, definem-se o primeiro e o segundo momentos de  $\Lambda$  como  $E[\Lambda_k] = \xi_k \varrho_k$  e  $E[\Lambda_k^2] = \xi_k(1 + \xi_k)\varrho_k^2$  (Papoulis; Pillai, 2002). De (KARAGIANNIDIS et al., 2007, Eq. 9), o momento de  $n$ -ésima ordem de  $Z_k$  pode ser determinado como

$$E[Z_k^n] = \frac{\Gamma(m_{pk} + \frac{n}{2})\Gamma(m_{kd} + \frac{n}{2})}{\Gamma(m_{pk})\Gamma(m_{kd})} \left(\frac{\lambda_{pk}}{m_{pk}}\right)^{\frac{n}{2}} \left(\frac{\lambda_{kd}}{m_{kd}}\right)^{\frac{n}{2}}. \quad (3.36)$$

Assim igualando os termos  $E[Z_k] = E[\Lambda_k]$  e  $E[Z_k^2] = E[\Lambda_k^2]$  e após algumas manipulações algébricas,  $\xi_k$  e  $\varrho_k$  podem ser escritas em função dos parâmetros de uma variável aleatória Nakagami- $m$   $\Gamma_s(\xi_s, \varrho_s)$  e  $\Gamma_r(\xi_r, \varrho_r)$ .

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{rd}^{FD} &= \Pr \left[ \log_2 \left( 1 + \mathcal{K} \left( \frac{|h_{ps}|^2 |h_{sd}|^2 + |h_{pr}|^2 |h_{rd}|^2}{|h_{pd}|^2} \right) \right) < \frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)} \right] \\ &= \int_0^\infty \int_0^\infty \sqrt{\frac{\frac{\mathcal{R}}{Z_{pd}} (2^{\frac{\mathcal{R}}{(1-\alpha)\beta}} - 1)}{\mathcal{K}}} - (Z_r)^2} \int_0^\infty \sqrt{\frac{\frac{\mathcal{R}}{Z_{pd}} (2^{\frac{\mathcal{R}}{(1-\alpha)\beta}} - 1)}{\mathcal{K}}} - (Z_r)^2} \frac{\varrho_s^{\xi_s} e^{-\frac{Z_s}{\varrho_s}} Z_s^{\xi_s-1}}{\Gamma(\xi_s)} \frac{\varrho_r^{\xi_r} e^{-\frac{Z_r}{\varrho_r}} Z_r^{\xi_r-1}}{\Gamma(\xi_r)} e^{-\frac{Z_{pd}}{\lambda_{pd}}} dZ_s dZ_r dZ_{pd} \end{aligned} \quad (3.37)$$

Consequentemente, considerando  $Z_k^2 \approx |h_{pk}|^2 |h_{kd}|^2$  e resolvendo as integrais em (3.37), a probabilidade de *outage*  $\mathcal{O}_{rd}^{FD}$  pode ser escrita como em (3.31).  $\square$

Considerando o cenário com desvanecimento Nakagami- $m$  com índice  $m = 1$  (Rayleigh) a probabilidade de *outage* do enlace  $R \rightarrow D$  ( $\mathcal{O}_{rd}^{FD}$ ) em (3.31) se reduz a

$$\mathcal{O}_{rd}^{FD} \approx 2^{-2\xi} \varrho_s^{-\xi} \varrho_r^{-\xi} (X\lambda_{pd})^\xi U \left( \frac{\xi}{2}, 0.5, \frac{X\lambda_{pd}}{4\varrho_s^2} \right) U \left( \frac{\xi}{2}, 0.5, \frac{X\lambda_{pd}}{4\varrho_r^2} \right), \quad (3.38)$$

onde  $\xi_s = \xi_r = \xi = 1.61$ ,  $\varrho_s = 0.4878\sqrt{\lambda_{ps}\lambda_{sd}}$  e  $\varrho_r = 0.4878\sqrt{\lambda_{pr}\lambda_{rd}}$  conforme (ALVES et al., 2013, Eq. 9 e Eq. 10) respectivamente, conforme apresentado em (PEREIRA et al.,

2017).

### 3.3.2 Protocolo de Captação de Energia *Half-Duplex* Cognitivo

Analisaremos também um esquema HD de captação de energia com detecção conjunta EH-HDJD no qual o protocolo de transmissão é o descrito na Figura 3.2. A probabilidade de *outage* pode ser escrita da mesma forma da seção anterior:

$$\mathcal{O}^{\text{EH-HDJD}} = \mathcal{O}_{sd}^{HD} (\mathcal{O}_{sr}^{HD})^U + (1 - (\mathcal{O}_{sr}^{HD})^U) \mathcal{O}_{rd}^{HD}. \quad (3.39)$$

Para resolver (3.39), precisamos resolver os termos individualmente, assim as probabilidades de *outage* dos enlaces  $S \rightarrow D$ ,  $S \rightarrow R$  e  $R \rightarrow D$  podem ser descritas, respectivamente, como

$$\mathcal{O}_{sd}^{HD} = \Pr \left[ \log_2 \left( 1 + \mathcal{K} \left( \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N |h_{p_l s^n}|^2 |h_{s^n d}^*|^2}{\sum_{l=1}^L |h_{p_l d}|^2} \right) \right) < \frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)} \right], \quad (3.40)$$

$$\mathcal{O}_{sr*}^{HD} = \Pr \left[ \log_2 \left( 1 + \frac{\mathcal{K} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N |h_{p_l s^n}|^2 \|h_{s^n r_*}^*\|^2}{\sum_{l=1}^L |h_{p_l r_*}|^2} \right) < \frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)} \right], \quad (3.41)$$

$$\mathcal{O}_{r*d}^{FD} = \Pr \left[ \log_2 \left( 1 + \frac{\mathcal{K} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N (|h_{p_l s^n}|^2 |h_{s^n d}^*|^2 + |h_{p_l r_*}|^2 |h_{r_* d}^*|^2)}{\sum_{l=1}^L |h_{p_l d}|^2} \right) < \frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)} \right]. \quad (3.42)$$

Usando as mesmas simplificações para o FD, será considerado na análise um transmissor primário, uma fonte secundária, um *relay* e um destino, sendo que todos os elementos da rede possuem apenas uma única antena. Assim, as expressões (3.40), (3.41) e (3.42) se resumem a

$$\mathcal{O}_{sr}^{HD} = \Pr \left[ \log_2 \left( 1 + \frac{\mathcal{K} |h_{ps}|^2 |h_{sd}|^2}{|h_{pd}|^2} \right) < \frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)} \right], \quad (3.43)$$

$$\mathcal{O}_{sr}^{HD} = \Pr \left[ \log_2 \left( 1 + \frac{\mathcal{K} |h_{ps}|^2 |h_{sr}|^2}{|h_{pr}|^2} \right) < \frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)} \right], \quad (3.44)$$

$$\mathcal{O}_{rd}^{HD} = \Pr \left[ \log_2 \left( 1 + \mathcal{K} \left( \frac{|h_{ps}|^2 |h_{sd}|^2 + |h_{pr}|^2 |h_{rd}|^2}{|h_{pd}|^2} \right) \right) < \frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)} \right], \quad (3.45)$$

onde a probabilidade de *outage* ( $\mathcal{O}_{sd}^{HD}$ ) em (3.43) é a mesma encontrada em (3.9) com valor de  $\mathcal{Z}_{md}$  o mesmo encontrado em (3.10) e considerando o valor de  $\beta = \frac{1}{2}$ . Para o enlace  $S \rightarrow R$  a probabilidade de *outage* ( $\mathcal{O}_{sr}^{HD}$ ) em (3.44) é o mesmo resultado encontrado em (3.26) e  $\mathcal{Z}_{mr}$  o mesmo encontrado em (3.27) e considerando o valor de  $\beta = \frac{1}{2}$ . Já a probabilidade de *outage* para o enlace  $R \rightarrow D$  ( $\mathcal{O}_{rd}^{HD}$ ) em (3.45) pode ser encontrada da mesma forma que em (3.31) também considerando  $\beta = \frac{1}{2}$ .

Se considerarmos um cenário com desvanecimento Rayleigh a probabilidade de *outage* ( $\mathcal{O}_{sd}^{HD}$ ) é a mesma encontrada em (3.11) sendo o valor da constante  $\mathcal{Z}_d$  o mesmo em (3.12) com  $\beta = \frac{1}{2}$ . Para o enlace  $S \rightarrow R$  a probabilidade de *outage* ( $\mathcal{O}_{sr}^{HD}$ ) é a mesma apresentada em (3.11) substituindo  $\mathcal{Z}_d$  por  $\mathcal{Z}_r$ , sendo o valor de  $\mathcal{Z}_r$  o mesmo em (3.28) com  $\beta = \frac{1}{2}$ . Já a probabilidade de *outage* do enlace  $R \rightarrow D$  ( $\mathcal{O}_{rd}^{HD}$ ) é a mesma encontra em (3.38), considerando o valor de  $\beta = \frac{1}{2}$ .

Para o cenário com múltiplos transmissores primários, uma fonte, um *relay* e um destino onde todos os nós da rede possui uma única antena, a probabilidade de *outage* para os enlaces dos enlaces  $S \rightarrow D$  ( $\mathcal{O}_{sd}^{HD}$ ) e  $S \rightarrow R$  ( $\mathcal{O}_{sr}^{HD}$ ) pode ser expressa da mesma forma que em (3.13) e (3.30), porém com  $\beta = \frac{1}{2}$ .

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS NUMÉRICOS

#### 4.1 Introdução

Este capítulo apresenta resultados numéricos para investigar o desempenho do esquema EH-FDJD em comparação com o esquema EH-HDJD, ambos com detecção conjunta no destino, e também com o desempenho do enlace direto DT sem cooperação. Simulações de Monte Carlo foram realizadas para validação das expressões analíticas encontradas. Primeiramente, será analisado o caso particular considerando o cenário sem linha de visada, desvanecimento Rayleigh, composto por um transmissor primário, uma fonte, um *relay* e um destino secundários, onde todos os nós possuem uma única antena, a fim de validar as expressões analíticas encontradas. Além disso, será analisado o efeito da linha de visada em dois casos específicos: linha de visada entre a rede primária e secundária e linha de visada entre os nós da rede secundária, fonte-*relay* e *relay*-destino para validação das expressões.

Também serão analisados os cenários com múltiplos transmissores primários e com múltiplos *relays*, que serão comparados aos valores simulados por simulação de Monte Carlo para validação das expressões analíticas. O cenário com múltiplos transmissores primários é composto por uma fonte, um *relay* e um destino secundários, já o cenário de múltiplos *relays* é composto por um transmissor primário, uma fonte, múltiplos *relays* e um destino secundários, sendo que os nós de todos os cenários possuem uma única antena. Ainda será analisado, apenas através de simulação de Monte Carlo, o cenário com múltiplas antenas na fonte e no *relay* que é composto por um transmissor primário, uma fonte, um *relay* e um destino secundários, sendo esse um único caso especial, onde a fonte e o *relay* possuem múltiplas antenas.

Para a realização da simulação de Monte Carlo é sorteado aleatoriamente um milhão de amostras considerando a função densidade de probabilidade do canal e levando em consideração a energia média que é dada em função da distância e do expoente de perda de percurso. Após a realização dos sorteios é feito o cálculo da informação mútua do canal através dos equacionamentos e o resultado é comparados ao valor da taxa esperada. Se o valor for menor do que a taxa esperada, é dito que aconteceu a *outage* no sistema, se for maior que a taxa esperada o houve sucesso na transmissão.

Para essas análises foram utilizados um expoente de perdas de percurso  $v = 4$  e  $\eta = 1^4$   $\mathcal{R} = 1$  [bpcu]. Os transmissor primários estão em forma de um cluster situado na coordenada (0,1) do sistema cartesiano, a fonte secundária S na coordenada (1,0) e o destino secundário D na coordenada (2,0). Os *relays*  $R_u^n$  também estão em uma espécie de cluster e estão situados na coordenada (1.5,0). Assim, todos os *relays* possuem a mesma distância para a fonte secundária, conseqüentemente, a mesma distância para os demais nós da rede. Da mesma forma, pode-se considerar os transmissores primários onde todos possuem a mesma distância para a rede secundária, pelo fato que eles também estão em uma espécie de cluster.

## 4.2 Cenário sem linha de visada

Na análise do cenário sem linha de visada, será considerado um único transmissor primário, uma fonte, um *relay* e um destino, onde todos os elementos possuem apenas uma única antena. Nessa análise, com o objetivo de encontrar a posição ótima para o *relay*, visando atingir a menor probabilidade de *outage* entre S e D, é avaliada a probabilidade de *outage* dos diferentes esquemas em função da variação da distância entre *relay* e a fonte, assim a posição do *relay* foi variada entre os nós S e D no cenário proposto. O valor de  $\alpha$  considerado nessa análise foi de  $\alpha = 0.5$  e  $m_{ij} = 1$  para todos os canais. O resultado é apresentado na Figura 4.1.

---

<sup>4</sup>Valores menores de  $\eta$  não mudariam as conclusões, visto que o efeito é similar em todos os esquemas, apenas deslocaria os valores no eixo  $y$  das figuras.

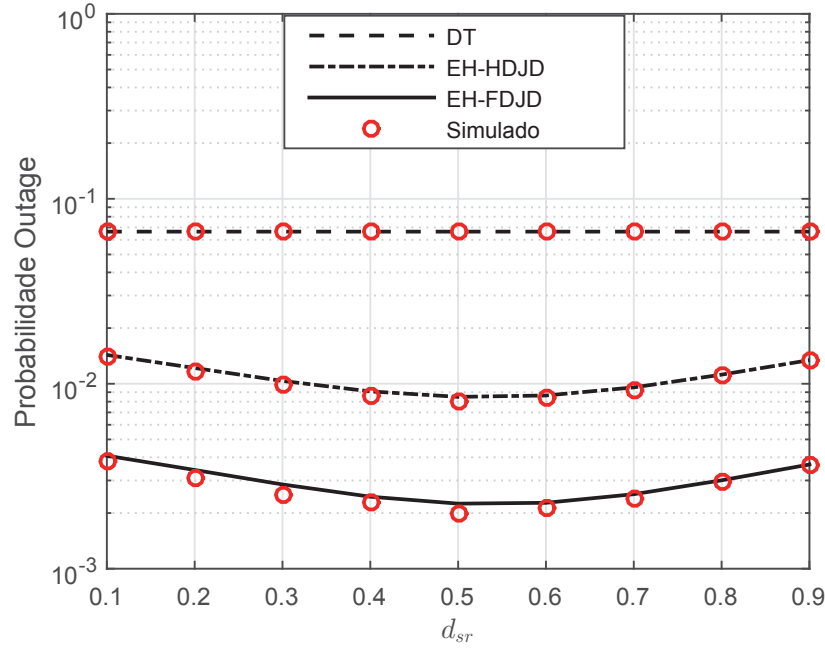


Figura 4.1: Probabilidade de *outage* dos diferentes esquemas em função de  $d_{sr}$  com  $\alpha = 0.5$ .

Primeiramente, pode ser observada a validade das expressões analíticas, visto que os valores calculados são muito próximos aos simulados. Pode se observar também que o esquema EH-FDJD apresenta o melhor desempenho entre todos os esquemas analisados. Além disso, percebe-se que a posição ótima do *relay* é exatamente no ponto médio entre S e D para todos os valores de  $\alpha$ <sup>5</sup>. Isto acontece devido ao fato de que quando R está próximo a S, há uma maior captação de energia, dado que ambos acabam ficando mais próximos do primário, porém a interferência do transmissor primário também aumenta, acarretando em uma maior probabilidade de *outage*. Já na ocasião em que R está mais próximo a D, a interferência do primário diminui, contudo, diminui também a captação de energia, o que acarreta em um aumento da probabilidade de *outage*. Diante disso, justifica a posição ótima do *relay* ser justamente o ponto médio entre S e D. Nessa análise, a transmissão direta foi mantida no gráfico apenas para fins de comparação com os outros esquemas.

Alterando a posição do transmissor primário para a posição (0,0), ou seja, mais próximo à rede secundária e considerando as mesmas características do cenário anterior,

<sup>5</sup>Para valores de  $\alpha$  diferentes de 0.5, o gráfico apenas se desloca de posição no eixo  $y$ , mantendo o mesmo comportamento característico de  $\alpha = 0.5$

pode ser observado a análise da probabilidade de *outage* em função de  $d_{sr}$  na Figura 4.2. Nessa análise, pode ser observado que a posição ótima para o *relay* é deslocada para mais próximo ao destino. Isto acontece devido ao transmissor primário estar mais próximo da rede secundária, consequentemente maior será a interferência no *relay* e no destino.

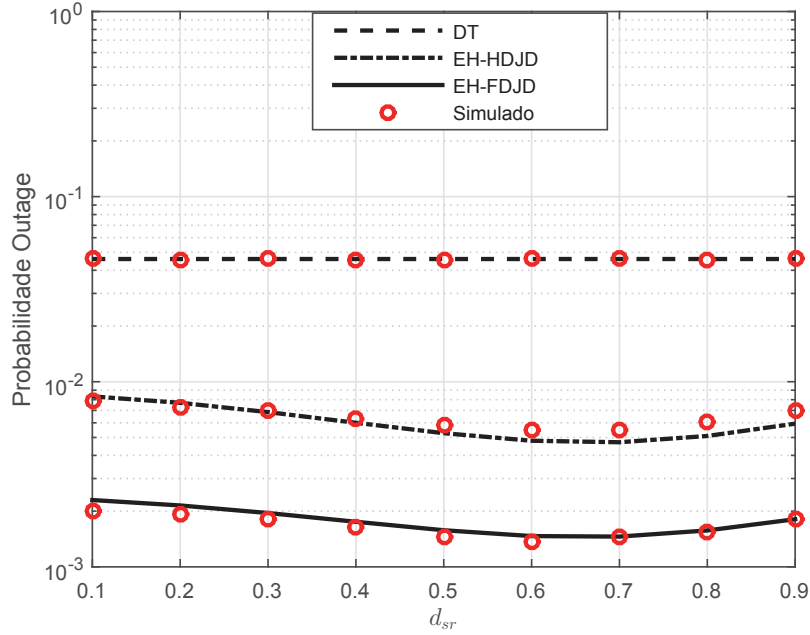


Figura 4.2: Probabilidade de *outage* dos diferentes esquemas em função de  $d_{sr}$  com  $\alpha = 0.5$  e o transmissor primário na posição (0,0).

Para as demais análises os múltiplos transmissores primários serão considerados estando fixos na posição (0,1) e o múltiplos *relays* na posição (1.5,0), visto ser essa a posição ótima quando o primário está na posição (0,1).

Na Figura 4.3 é apresentada a análise da probabilidade de *outage* em função do parâmetro de carregamento  $\alpha$  para os vários esquemas analisados. Esta análise é importante pois o valor de  $\alpha$  influencia tanto na potência quanto na taxa de transmissão. A distância considerada entre fonte e *relay* é  $d_{sr} = 0.5$  que corresponde à posição ótima do *relay* neste cenário particular como visto na Figura 4.1. Pode ser observado que para os menores valores de probabilidade do esquema proposto, o tempo de carregamento é maior em EH-FDJD, porém nenhum outro esquema atinge a mesma probabilidade de *outage* considerando todos os valores de  $\alpha$ . Além disso, pode-se observar que o esquema proposto pode obter uma menor probabilidade de *outage* com um tempo menor de carregamento e



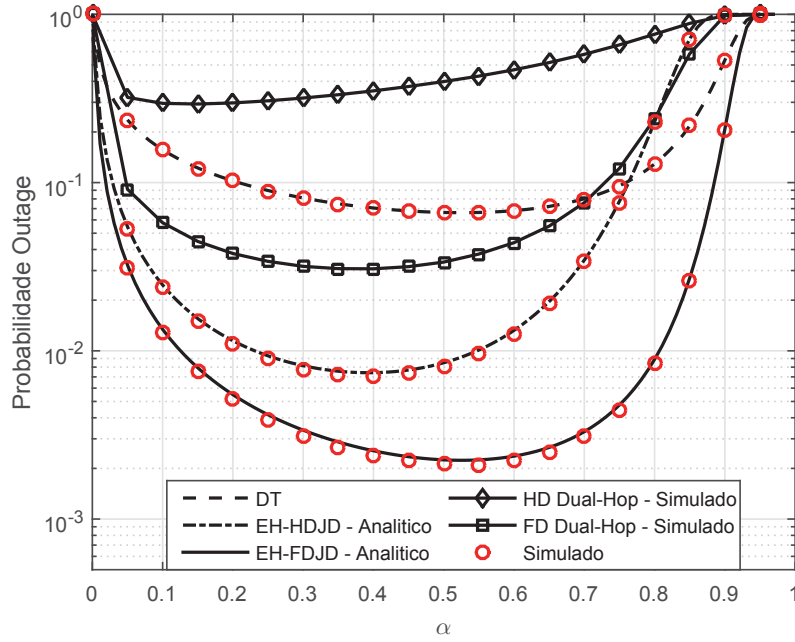


Figura 4.3: Probabilidade de *outage* dos diferentes esquemas em função de  $\alpha$  com  $d_{sr} = 0.5$  e  $\mathcal{R} = 1[\text{bpcu}]$ .

com isso dedicar mais tempo à fase de transmissão, por exemplo: Para uma probabilidade de outage de  $10^{-2}$  o valor de  $\alpha = 0.11$  em EH-FDJD e  $\alpha = 0.22$  em EH-HDJD.

Ainda na Figura 4.3 é mostrada a comparação com o esquema DH onde a informação direta é considerada como sinal interferente no destino ou é considerada como ruído, dado que o sinal é atenuado devido ao forte desvanecimento (LIU et al., 2016; YEOH et al., 2016). Pode ser observado que o esquema proposto apresenta melhor desempenho para todos os valores de  $\alpha$  analisados. Nota-se que o esquema DH FD tem um desempenho inferior até mesmo ao EH-HDJD. Diante disso, pode-se concluir que as técnicas de comunicação cooperativa com detecção conjunta são fundamentais para obter um melhor desempenho do sistema.

Já a Figura 4.4 apresenta a probabilidade de *outage* em função da variação da taxa de transmissão esperada, dada em bits por uso de canal (bpcu). Nessa análise considerou-se  $\alpha = 0.5$  e  $d_{sr} = 0.5$ . Pode-se observar que para uma determinada probabilidade de *outage*, o esquema EH-FDJD consegue até o dobro da taxa que em EH-HDJD, isso ocorre porque o esquema *full-duplex* transmite durante toda a fase de transmissão. Pode-se observar

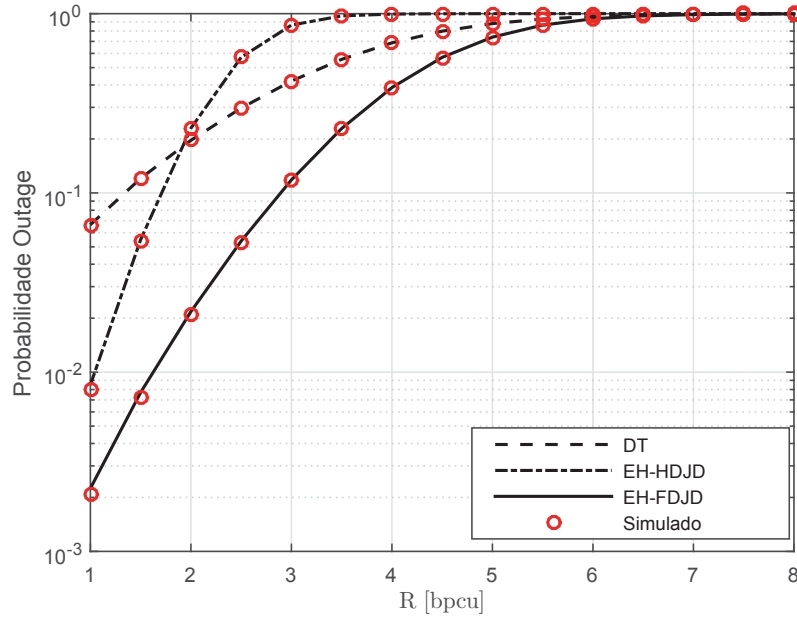


Figura 4.4: Probabilidade de *outage* dos diferentes esquemas em função da taxa de transmissão esperada  $\mathcal{R}$  com  $d_{sr} = 0.5$  e  $\alpha = 0.5$ .

também que o esquema EH-FDJD apresenta melhor desempenho para todos os valores da taxa de transmissão considerados em relação aos esquemas comparados.

### 4.3 Cenário com linha de visada

Nessa análise, será observado o efeito da linha de visada no esquema considerado, para isso serão feitas duas abordagens: a primeira será considerado o cenário com linha de visada para os enlaces  $P \rightarrow S$  e  $P \rightarrow R$  considerando os parâmetros  $m_{ps} = m_{pr} = \{1,2,4\}$  e os demais enlaces serão considerados com desvanecimento Rayleigh  $m_{pd} = m_{sd} = m_{sr} = m_{rd} = 1$ , em seguida será analisado a linha de visada entre os enlaces  $S \rightarrow R$  e  $R \rightarrow D$  com parâmetro  $m_{sr} = m_{rd} = \{1,2,4\}$  e os demais enlaces serão considerados com desvanecimento Rayleigh com parâmetros  $m_{ps} = m_{pr} = m_{pd} = m_{sd} = 1$ .

### 4.3.1 Linha de visada entre a rede primária e secundária $m_{ps} = m_{pr} = \{1,2,4\}$

Nessa análise será avaliada a influência da linha de visada entre a rede primária e secundária, dado que o sistema faz captação de energia da potência de transmissão da rede primária.

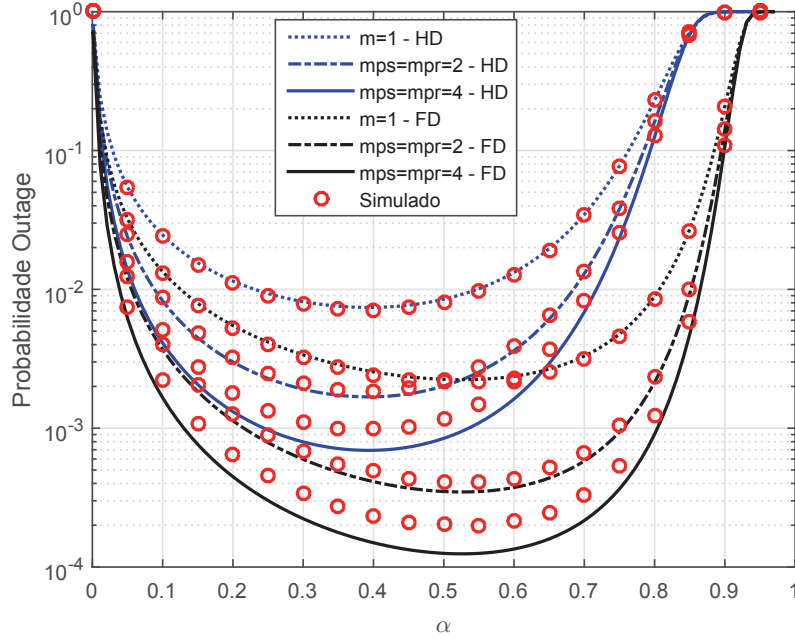


Figura 4.5: Probabilidade de *outage* em função de  $\alpha$  considerando  $m_{ps} = m_{pr} = \{1,2,4\}$  demais  $m_{sr} = m_{rd} = m_{sd} = m_{pd} = 1$  com  $\mathcal{R} = 1[bpcu]$

Na Figura 4.5 é apresentada a probabilidade de *outage* do esquema proposto em modo HD (EH-HDJD) e FD (EH-FDJD). Não foi considerado a comunicação direta entre fonte e destino, pois nos resultados anteriores sempre mostraram ser muito inferiores aos modos HD e FD. Pode-se notar que o desempenho do sistema apresenta uma melhora significativa quando comparado ao cenário sem linha de visada, fato esse totalmente esperado. Esse ganho acontece devido haver linha de visada entre os enlaces  $P \rightarrow S$  e  $P \rightarrow R$ . Com essa linha de visada o ganho dos canais  $h_{ps}$  e  $h_{pr}$  são maiores, conseguindo assim captar mais energia nos respectivos nós, com isso melhora o desempenho de todo o sistema. Apesar da interferência no *relay* também aumentar, os benefícios conseguidos com a captação de energia superam os problemas causados pela interferência do primário no *relay*. Pode

ser observado ainda que nesse cenário a probabilidade de *outage* com  $m_{ps} = m_{pr} = 4$  é aproximadamente  $1.3 \times 10^{-4}$  enquanto que no cenário sem linha de visada o valor é aproximadamente  $2.2 \times 10^{-3}$ .

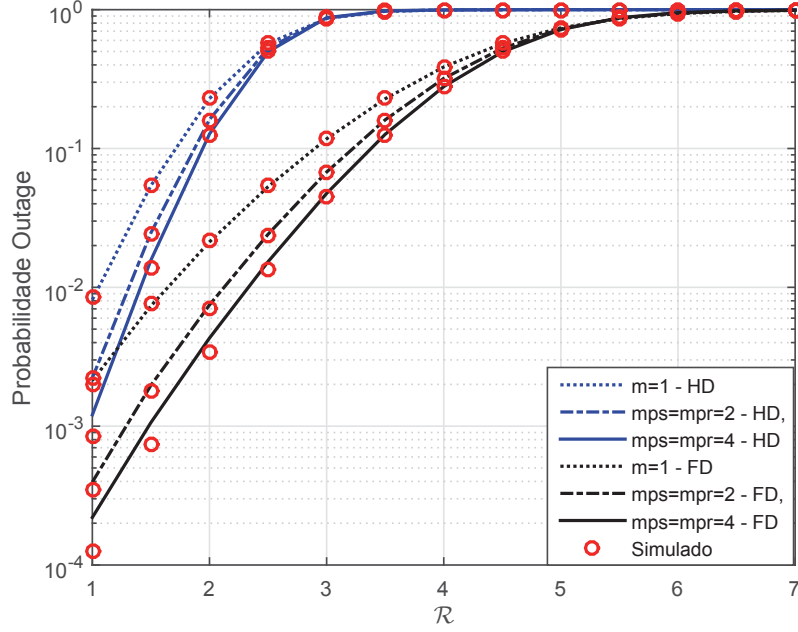


Figura 4.6: Probabilidade de *outage* em função da taxa  $\mathcal{R}$  considerando  $m_{ps} = m_{pr} = \{1,2,4\}$  demais  $m_{sr} = m_{rd} = m_{sd} = m_{pd} = 1$  e  $\alpha = 0.5$ .

A Figura 4.6 mostra a probabilidade de *outage* em função da taxa de transmissão esperada, que também apresenta um desempenho melhor quando comparado ao cenário sem linha de visada, como já era esperado. Além disso, percebe-se que a diferença entre analítico e simulado é pouco perceptível nessa análise, confirmando assim a validade das expressões analíticas.

#### 4.3.2 Linha de visada entre a fonte e o *relay* e entre o *relay* e o destino secundários $m_{sr} = m_{rd} = \{1,2,4\}$

Nessa análise, será considerada linha de visada apenas entre  $S \rightarrow R$  e  $R \rightarrow D$ , para verificar quais os efeitos causados na probabilidade de *outage* e comparar os resultados ao cenário com linha de visada entre a rede primária e secundária, analisado na sub-sessão anterior. Os demais enlaces serão considerados com desvanecimento Rayleigh.

A Figura 4.7 mostra a probabilidade de *outage* do esquema analisado modo HD (EH-HDJD) e FD (EH-FDJD) em função de  $\alpha$  considerando linha de visada apenas para  $S \rightarrow R$  e  $R \rightarrow D$ . Também não foi analisada a comunicação direta devido à mesma apresentar desempenho sempre inferior nas análises anteriores.

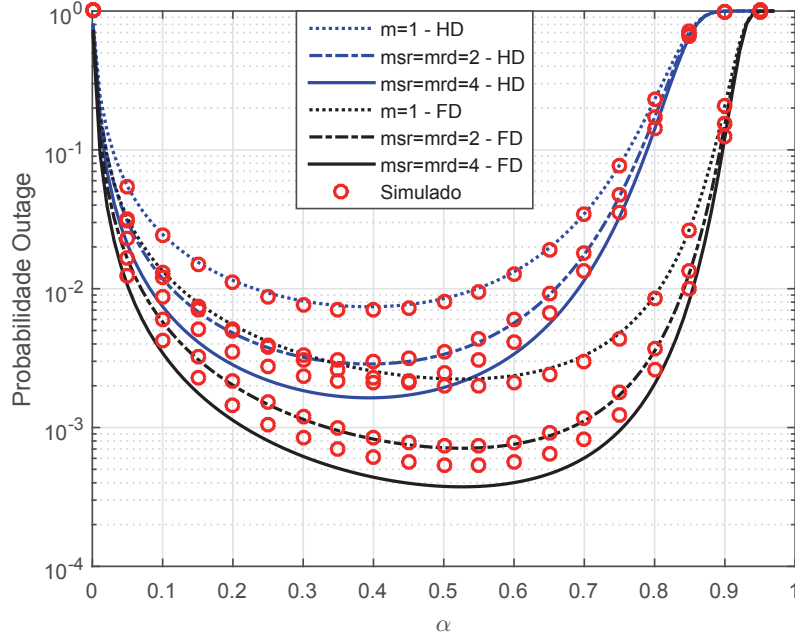


Figura 4.7: Probabilidade de *outage* em função de  $\alpha$  considerando  $m_{sr} = m_{rd} = \{1,2,4\}$  demais  $m_{ps} = m_{pr} = m_{pd} = m_{sd} = 1$  e  $\mathcal{R} = 1$  [bpcu].

Pode se observar na Figura 4.7 que o desempenho do sistema é um pouco inferior quando comparado ao cenário com linha de visada entre a rede primária e secundária conforme mostrado na Figura 4.5. Isto acontece pelo fato que na Figura 4.7 a linha de visada ocorre entre os enlaces  $S \rightarrow R$  e  $R \rightarrow D$ , que contribui apenas para melhorar o desempenho na comunicação desses enlaces, mantendo fixa a quantidade de energia armazenada. Já no caso da Figura 4.5 onde há linha de visada entre o primário e secundário, possibilita uma maior captação de energia, contribuindo pra melhorar o desempenho como um todo. Esse resultado permite concluir que a linha de visada entre a rede primária e secundária produz melhor desempenho se comparado à situação em que há linha de visada apenas entre os elementos da rede secundária.

Já a Figura 4.8 mostra a probabilidade de *outage* do esquema analisado modo HD (EH-HDJD) e FD (EH-FDJD) em função da taxa de transmissão esperada  $\mathcal{R}$  considerando

linha de visada apenas entre  $S \rightarrow R$  e  $R \rightarrow D$ . Considerando mesma a análise anterior, à taxa alcançada também é menor quando comparada ao cenário com linha de visada entre rede primária e secundária mostrado na Figura 4.6, isso devido as mesmas características apresentadas anteriormente, quando a linha de visada entre rede primária e secundária proporciona uma maior captação de energia, conseqüentemente um melhor desempenho da rede como um todo.

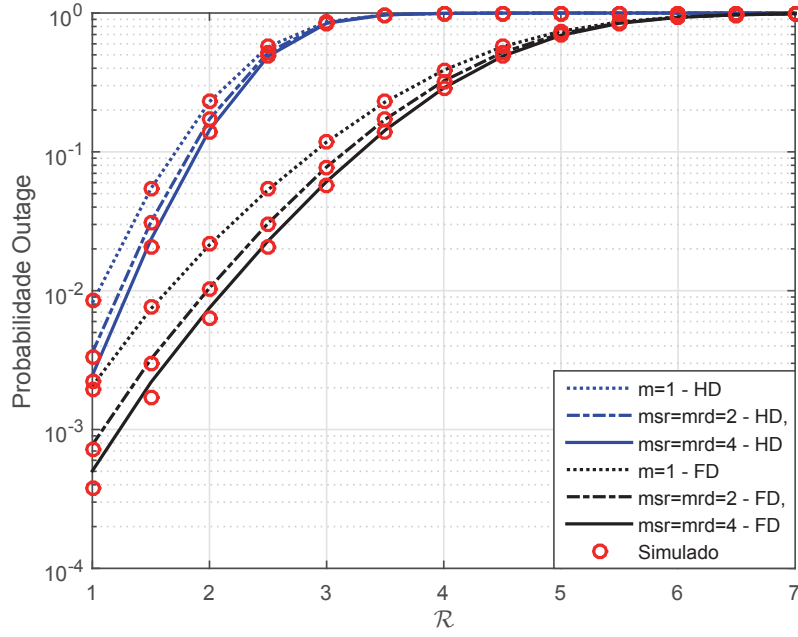


Figura 4.8: Probabilidade de *outage* em função da taxa  $\mathcal{R}$  considerando  $m_{sr} = m_{rd} = \{1,2,4\}$  demais  $m_{ps} = m_{pr} = m_{pd} = m_{sd} = 1$

#### 4.4 Cenário múltiplos *relays*

O cenário com múltiplos *relays* é analisado levando em consideração que os *relays* estão todos próximos um ao outro de forma que se assemelha a um cluster. Assim, será considerada a mesma distância para todos os *relays*. Nessa análise, será considerado um transmissor primário, uma fonte, um destino e múltiplos *relays*, sendo que todos os nós da rede possuem uma única antena. Além disso, será considerado desvanecimento Rayleigh com parâmetro  $m_{ij} = 1$  para todos os canais. Essa análise é importante para verificar os benefícios alcançados com o emprego de múltiplos *relays* no desempenho do sistema

em termos de probabilidade de *outage*. Os resultados encontrados serão comparados aos demais cenários para verificar qual cenário apresenta melhor desempenho.

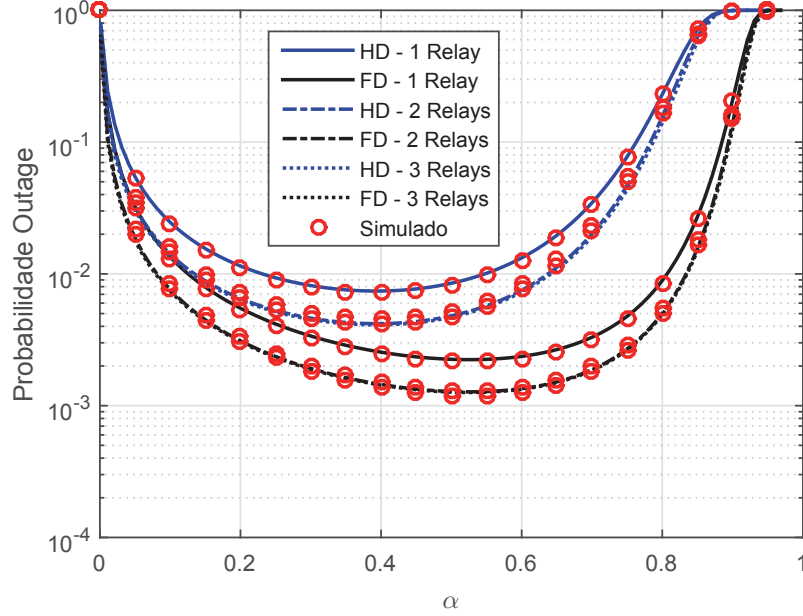


Figura 4.9: Probabilidade de *outage* em função de  $\alpha$  com múltiplos *relays*, considerando  $m_{ij} = 1$  e  $\mathcal{R} = 1$  [bpcu].

A Figura 4.9 mostra a probabilidade de *outage* para o esquema proposto em função do parâmetro  $\alpha$ , com  $\mathcal{R} = 1$  [bpcu] e múltiplos *relays*. Nessa análise as expressões analíticas são as mesmas encontradas no Capítulo 3, visto que nas expressões é citado apenas o *relay* selecionado, que é o mesmo caso considerando apenas um *relay*. A diferença é que o *relay* selecionado para transmitir a informação, é aquele com o melhor ganho de canal entre todos os *relays*. Assim, o *relay* com melhor ganho de canal no enlace  $R \rightarrow D$  terá o menor tempo de controle e assim fará a transmissão. Os outros *relays* que terão um tempo de controle maior, irão perceber a transmissão e não fará nenhuma transmissão. Para encontrar a probabilidade de *outage* total é levado em consideração o número total de *relays*.

Pode ser observado na Figura 4.9 que o desempenho do sistema melhora com a presença de múltiplos *relays*. Isso acontece porque a fonte secundária tem mais possibilidades para fazer a transmissão da informação, o que acaba aumentando as chances de decodificação das mensagens pelos *relays*, garantindo assim uma melhor probabilidade de *outage*.

Nota-se que o desempenho com três *relays* apresentou uma diferença muito pequena comparado a análise com dois *relays*, fato este que nos leva a concluir que o acréscimo de mais *relays* não trará melhorias significativas ao desempenho, visto que os benefícios alcançados são mínimos e os ganhos dos canais são muito parecidos, não justificando o custo de se acrescentar mais *relays*.

## 4.5 Cenário múltiplos transmissores primários

A análise com múltiplos transmissores primários é importante para verificar qual o efeito causado por eles na probabilidade de *outage* na rede secundária. Como a fonte e o *relay* fazem captação de energia do sinal transmitido pelo primário, irá proporcionar maior possibilidade para captação de energia, porém a interferência causada no *relay* e no destino também será maior. Esse cenário será analisado levando em consideração que todos os primários operam na mesma frequência. Nessa análise será considerado uma fonte, um *relay* e um destino, onde cada um dos nós possui uma única antena. Além disso, será considerado desvanecimento Rayleigh para todos os enlaces da rede sendo o parâmetro  $m_{ij} = 1$  para todos os canais.

A Figura 4.10 mostra a probabilidade de *outage* para o cenário analisado em função do tempo de carregamento  $\alpha$  na presença de múltiplos transmissores primários. Pode ser observado na Figura 4.10 que o desempenho do sistema apresenta uma melhora significativa com a presença de dois e três transmissores primários, porém na presença de quatro transmissores primários o sistema apresenta um ganho pequeno em relação a três transmissores primários. Além disso, pode-se perceber que com a presença de múltiplos transmissores primários a fonte e o *relay* conseguem armazenar mais energia, porém a interferência causada pelo primário no *relay* e no destino também irá aumentar, e com isso irá afetar a probabilidade de *outage* do sistema. Mesmo com um número grande de transmissores primários e a fonte e o *relay* conseguindo armazenar muita energia, o desempenho não terá uma melhora significativa.



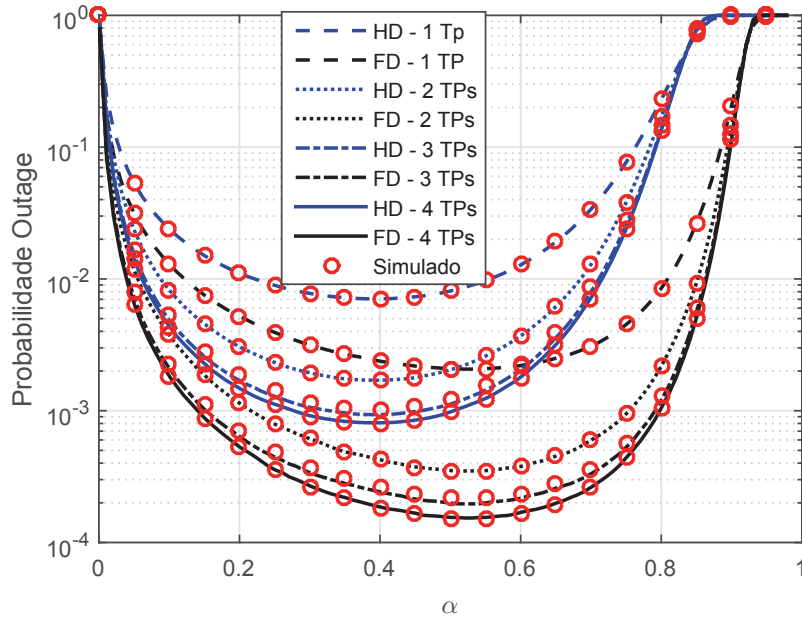


Figura 4.10: Probabilidade de *outage* em função de  $\alpha$  considerando  $m_{ij} = 1$  e  $\mathcal{R} = 1$  [bpcu].

#### 4.6 Cenário com múltiplas antenas na fonte e no *relay*

O cenário com múltiplas antenas na fonte secundária e no *relay* é analisado levando em consideração que todas as antenas, tanto da fonte quanto do *relay*, podem captar energia e além disso, podem transmitir e receber informações ao mesmo tempo. Na fonte secundária será aplicada a técnica TAS e no *relay* a técnica MRC. Nessa análise será considerado apenas um transmissor primário, uma fonte, um *relay* e um destino, sendo que o transmissor primário e o destino possuem apenas uma única antena, já a fonte e o *relay* possui múltiplas antenas em cada um. Essa análise é importante para verificar os efeitos proporcionado pelas múltiplas antenas da fonte e do *relay*, visto que as mesmas fazem captação de energia através do sinal recebido do primário, assim, mais antenas proporcionará maior quantidade de energia captada além de apresentar um ganho de diversidade espacial. Os resultados obtidos serão comparados aos resultados dos outros cenários analisados.

A Figura 4.11 mostra a probabilidade de *outage* para o cenário analisado em função do tempo de carregamento  $\alpha$ , com  $\mathcal{R} = 1$  [bpcu] e múltiplas antenas na fonte secundária

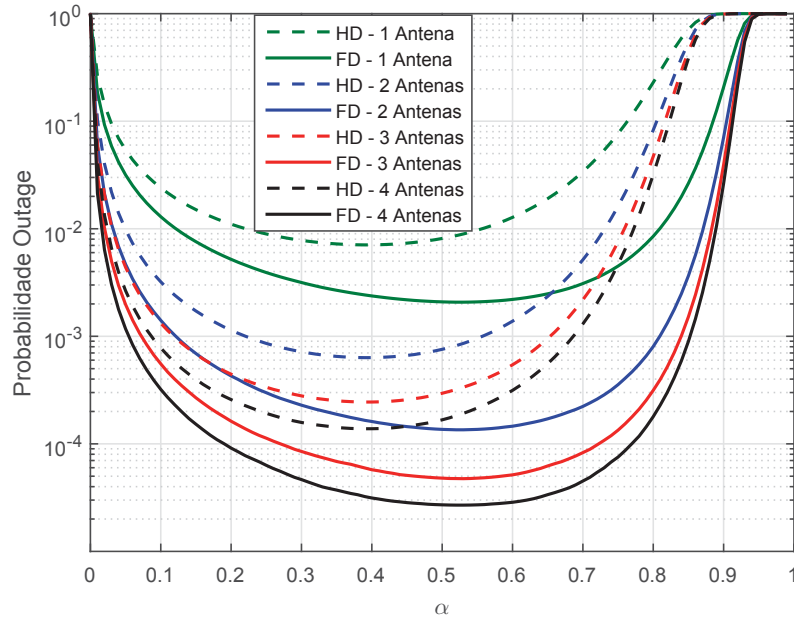


Figura 4.11: Probabilidade de *outage* em função de  $\alpha$  com múltiplas antenas na fonte secundária e no *relay* considerando  $m_{ij} = 1$ .

e no *relay*. Pode ser observado que o desempenho do sistema melhora consideravelmente. Isso acontece, primeiramente, pelo fato de que as múltiplas antenas proporcionam maior captação de energia e também contribui pra melhorar o desempenho devido as técnicas de combinação de sinais e seleção de antenas TAS/MRC aplicada no enlace  $S \rightarrow R$ , onde em S é selecionada a antena que proporciona o melhor ganho para a transmissão através da técnica TAS, e em R é empregada a técnica MRC que faz a combinação dos sinais recebidos em todas as antenas. Já no enlace  $R \rightarrow D$  o *relay* apenas seleciona a antena com melhor ganho para transmissão das informações através da técnica TAS. Assim, no destino é aplicado a técnica de detecção conjunta nos sinais recebidos da melhor antena do *relay* e da fonte secundária.

Comparado ao cenário com múltiplos *relays* mostrado na Figura 4.9, esse cenário apresenta desempenho superior, no qual pode ser observado que a probabilidade de *outage* mínima para quatro antenas é aproximadamente  $3.5 \times 10^{-5}$  já no cenário com múltiplos *relays* é aproximadamente  $1.5 \times 10^{-2}$ . Essa diferença se da pelo fato de que no cenário com múltiplos *relays* é escolhido apenas o *relay* que proporciona melhor ganho, já no cenário com múltiplas antenas, além de escolher qual antena possui melhor ganho, ainda é feita

a soma das SNRs recebidas no *relay*, e ainda é feito uma nova seleção de antenas entre o *relay* e o destino.

## 4.7 Considerações Finais

Neste capítulo foi avaliado o desempenho em termos de probabilidade de *outage*. Primeiramente, avaliou-se em cenário simples com apenas um transmissor primário, uma fonte, um *relay* e um destino, sendo que todos os elementos da rede possuíam uma única antena, sem linha de visada entre todos os elementos da rede, onde foi possível confirmar a exatidão das aproximações em forma fechada dada nos Teoremas 1 e 2 para as probabilidades de *outage* dos esquemas analisados. A seguir, foi analisado o cenário com linha de visada entre os enlaces  $P \rightarrow S$  e  $P \rightarrow R$  com parâmetro dos canais  $m_{ps} = m_{pr} = \{1,2,4\}$  e demais enlaces sem linha de visada com parâmetro  $m_{sd} = m_{sr} = m_{rd} = m_{pd} = 1$ . Também foi considerado linha de visada nos enlaces  $S \rightarrow R$  e  $R \rightarrow D$  com os parâmetros dos canais  $m_{sr} = m_{rd} = \{1,2,4\}$  e demais enlaces sem linha de visada, onde os parâmetros dos canais eram  $m_{ps} = m_{pr} = m_{pd} = m_{sd} = 1$ . A análise foi estendida para outros cenários como: múltiplos transmissores primários, múltiplos *relays* e múltiplas antenas na fonte e no *relay*, porém nessas últimas análises foi considerado desvanecimento Rayleigh.

Pode-se observar através dos resultados numéricos que a melhor posição para o *relay* é justamente no ponto médio entre a fonte e o destino para todos os valores de  $\alpha$ , no qual apresenta a menor probabilidade de *outage*, porém se alterar a posição do transmissor primário para mais próximo a fonte secundária, a posição ótima para o *relay* tende a se deslocar em direção ao destino. Nota-se ainda que o protocolo FD (EH-FDJD) apresenta melhor desempenho que o HD (EH-HDJD), *Dual-Hop* e transmissão direta (DT) para todos os valores de  $\alpha$ . Foi verificado também que o sistema quando tem linha de visada entre os enlaces  $P \rightarrow S$  e  $P \rightarrow R$  apresenta um desempenho melhor quando comparado ao cenário onde há linha de visada entre os enlaces  $S \rightarrow R$  e  $R \rightarrow D$ .

Além disso, foi demonstrado através de simulação de Monte Carlo que o sistema com

múltiplas antenas na fonte secundária e no *relay* apresenta melhor desempenho quando comparado a múltiplos *relays* e múltiplos transmissores primários. Isso ocorre pelo fato de que as múltiplas antenas, além de proporcionar maior captação de energia, também melhoram o desempenho da comunicação devido às técnicas de combinação de sinais e seleção de antenas, como, TAS/MRC no enlace  $S \rightarrow R$  e TAS no enlace  $R \rightarrow D$ . No cenário com múltiplos *relays*, a técnica de seleção de *relays* apenas proporciona a possibilidade da escolha de um *relay* que apresenta melhor ganho de canal no enlace  $R \rightarrow D$ . Já no cenário com múltiplos transmissores primários, o desempenho é prejudicado pelo número de transmissores primários. Com a presença de mais transmissores primários é possível armazenar mais energia, entretanto, a interferência no *relay* e no destino também aumenta, prejudicando o desempenho do sistema.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O objetivo principal desta dissertação foi avaliar o desempenho de um sistema *full-duplex* cognitivo cooperativo com captação de energia. Baseado nisto, no Capítulo 2 foram apresentadas as principais técnicas de captação de energia em redes sem fio, e as características das redes cognitivas e também foi introduzido à técnica de comunicação cooperativa. O modelo proposto foi analisado em alguns cenários de interesse separadamente, no qual foi caracterizado analiticamente no Capítulo 3 levando em consideração o perfeito conhecimento do estado do canal. Foram derivadas aproximações em forma fechada da probabilidade de *outage* para três cenários particulares propostos. Além disso, foi analisado, apenas por simulação o cenário com múltiplas antenas na fonte e no *relay*, onde foi aplicada a técnica TAS/MRC no enlace  $S \rightarrow R$  e TAS no enlace  $R \rightarrow D$ .

Os resultados mostram a existência de uma posição ótima para o *relay* que é justamente o ponto médio entre S e R para todos os valores de  $\alpha$ , porém, se o transmissor primário estiver mais próximo à fonte, a posição ótima é deslocada em direção ao destino. Foi verificado também que o desempenho do sistema é melhor quando há linha de visada entre os enlaces  $P \rightarrow S$  e  $P \rightarrow R$ , quando comparado ao cenário onde há linha de visada entre  $S \rightarrow R$  e  $R \rightarrow D$ . Isso acontece pelo fato que, quando há linha de visada entre  $P \rightarrow S$  e  $P \rightarrow R$ , a fonte e o *relay* conseguem armazenar mais energia, enquanto que, quando há linha de visada entre  $S \rightarrow R$  e  $R \rightarrow D$ , proporciona apenas uma melhoria na comunicação entre esses nós, não alterando a quantidade de energia captada. Além disso, foi mostrado que o desempenho do sistema é melhor no cenário com múltiplas antenas na fonte e no *relay* quando comparado aos demais cenários analisados, mesmo quando não há linha de visada em nenhum enlace. Isto acontece devido a maior possibilidade de armazenamento de energia, devido às múltiplas antenas e também pelas técnicas de combinação de sinais

TAS/MRC empregada nos enlaces  $S \rightarrow R$  e  $R \rightarrow D$  alcançando quase uma ordem de diversidade. Um fato já esperado, acontece no cenário com múltiplos transmissores primários, no qual, a presença de múltiplos primários possibilita a rede secundária captar mais energia, porém essa presença aumenta a interferência no *relay* e no destino, o que acaba prejudicando o desempenho na rede secundária.

Em geral, percebe-se que quando o sistema consegue captar mais energia, apresenta melhor desempenho em termos de probabilidade de *outage*, como no caso onde há linha de visada entre a rede primária e secundária. Para o cenário com múltiplas antenas o desempenho é superior quando comparado aos cenários múltiplos de *relays* e múltiplos transmissores primários, mostrando que as técnicas de combinação de sinais são valiosas para se obter um melhor desempenho. No caso de múltiplos transmissores primários, o desempenho do sistema é influenciado pela quantidade de transmissores primários na região de alcance. Mais transmissores primários permitem maior captação de energia, semelhante ao cenário com múltiplas antenas, porém a interferência também será maior, com isso, mesmo o sistema conseguindo captar mais energia, não atingirá desempenho ótimo como no caso do cenário com múltiplas antenas na fonte e no *relay*.

Como sugestão de trabalhos futuros, considerando os mesmos cenários analisados, avaliar outras métricas de desempenho do sistema e podendo ainda considerar uma otimização do parâmetro de carregamento para melhorar o desempenho do sistema. Considerando o cenário analisado, seria interessante analisar o impacto da existência de múltiplos destinos primários próximos a rede secundária, e ainda para uma análise mais realista, considerar os transmissores primários em posições aleatórias utilizando geometria estocástica. Pode se também considerar nas análises, o tempo e energia gastos para envio de bits piloto para estimação dos canais. Outra sugestão a ser considerada é encontrar expressões analíticas fechadas para as análises com múltiplas antenas na fonte e no *relay* e múltiplos transmissores primários considerando canais Nakagami- $m$  em todas as análises. Ainda pode ser analisado uso da técnica *beamforming* ao invés de TAS no cenário com múltiplas antenas na fonte e no *relay*.

## BIBLIOGRAFIA

ABRAMOWITZ, M. **Handbook of Mathematical Functions, With Formulas, Graphs, and Mathematical Tables**,. Dover Publications, Incorporated, 1974. ISBN 0486612724.

AKYILDIZ, I.; SU, W.; SANKARASUBRAMANIAM, Y.; CAYIRCI, E. Wireless sensor networks: a survey. **Computer Networks**, v. 38, n. 4, p. 393 – 422, 2002. ISSN 1389-1286.

ALVES, H.; COSTA, D. B. da; SOUZA, R. D.; LATVA-AHO, M. Performance of block-markov full duplex relaying with self interference in nakagami-m fading. **IEEE Wireless Communications Letters**, v. 2, n. 3, p. 311–314, Junho 2013. ISSN 2162-2337.

AMER, R.; EL-SHERIF, A. A.; EBRAHIM, H.; MOKHTAR, A. Cooperative cognitive radio network with energy harvesting: Stability analysis. In: **2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)**. Kauai, Hawaii, USA, 2016. p. 1–7.

ANH, P. V. T.; BAO, V. N. Q.; LE, K. N. On the performance of wireless energy harvesting tas/mrc relaying networks over nakagami-m fading channels. In: **2016 3rd National Foundation for Science and Technology Development Conference on Information and Computer Science (NICS)**. Danang City, Vietnam, 2016. p. 1–5.

ATAPATTU, S.; EVANS, J. Optimal energy harvesting protocols for wireless relay networks. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 15, n. 8, p. 5789–5803, Ago 2016. ISSN 1536-1276.

BLAGOJEVIC, V.; IVANIS, P. Ergodic capacity for tas/mrc spectrum sharing cognitive radio. **IEEE Communications Letters**, v. 16, n. 3, p. 321–323, Março 2012. ISSN 1089-7798.

BLETSAS, A.; LIPPNIAN, A.; REED, D. P. A simple distributed method for relay selection in cooperative diversity wireless networks, based on reciprocity and channel measurements. In: **2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference**. Estocolmo, Suécia, 2005. v. 3, p. 1484–1488 Vol. 3. ISSN 1550-2252.

BLETSAS, A.; SHIN, H.; WIN, M. Z. Cooperative communications with outage-optimal opportunistic relaying. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, IEEE Press, Piscataway, NJ, USA, v. 6, n. 9, p. 3450–3460, 2007. ISSN 1536-1276.

CHENG, P.; HE, S.; JIANG, F.; GU, Y.; CHEN, J. Optimal scheduling for quality of monitoring in wireless rechargeable sensor networks. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 12, n. 6, p. 3072–3084, Junho 2013. ISSN 1536-1276.

DUARTE, M.; DICK, C.; SABHARWAL, A. Experiment-driven characterization of full-duplex wireless systems. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 11, n. 12, p. 4296–4307, Dezembro 2012. ISSN 1536-1276.

FOULADGAR, A. M.; SIMEONE, O. On the transfer of information and energy in multi-user systems. **IEEE Communications Letters**, v. 16, n. 11, p. 1733–1736, Novembro 2012. ISSN 1089-7798.

GASTPAR, M. On capacity under receive and spatial spectrum-sharing constraints. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 53, n. 2, p. 471–487, Fev 2007. ISSN 0018-9448.

GHASEMI, A.; SOUSA, E. S. Fundamental limits of spectrum-sharing in fading environments. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 6, n. 2, p. 649–658, Fev 2007. ISSN 1536-1276.

GOLDSMITH, A. **Wireless communications**. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2005. ISBN 0-521-83716-2.



GOLDSMITH, A.; JAFAR, S. A.; MARIC, I.; SRINIVASA, S. Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: An information theoretic perspective. **Proceedings of the IEEE**, v. 97, n. 5, p. 894–914, Maio 2009. ISSN 0018-9219.

GRADSHTEYN, I. S.; RYZHIK, I. M. **Table of integrals, series, and products**. Seventh. Elsevier/Academic Press, Amsterdam, 2007.

HAYKIN, S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 23, n. 2, p. 201–220, Fev 2005. ISSN 0733-8716.

HE, S.; CHEN, J.; JIANG, F.; YAU, D. K. Y.; XING, G.; SUN, Y. Energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, v. 12, n. 10, p. 1931–1942, Out 2013. ISSN 1536-1233.

HOANG, D. T.; NIYATO, D.; WANG, P.; KIM, D. I. Performance optimization for cooperative multiuser cognitive radio networks with rf energy harvesting capability. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 14, n. 7, p. 3614–3629, Julho 2015. ISSN 1536-1276.

HU, S.; DING, Z.; NI, Q.; YUAN, Y. Beamforming optimization for full-duplex cooperative cognitive radio networks. In: **2016 IEEE 17th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)**. Edimburgo, Reino Unido, 2016. p. 1–5.

HUANG, K.; LAU, V. K. N. Enabling wireless power transfer in cellular networks: Architecture, modeling and deployment. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 13, n. 2, p. 902–912, Fevereiro 2014. ISSN 1536-1276.

ISHIBASHI, K.; OCHIAI, H.; TAROKH, V. Energy harvesting cooperative communications. In: **2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications - (PIMRC)**. Sydney, Australia, 2012. p. 1819–1823. ISSN 2166-9570.

KAMALINEJAD, P.; MAHAPATRA, C.; SHENG, Z.; MIRABBASI, S.; LEUNG, V. C. M.; GUAN, Y. L. Wireless energy harvesting for the internet of things. **IEEE Communications Magazine**, v. 53, n. 6, p. 102–108, Junho 2015. ISSN 0163-6804.

KARAGIANNIDIS, G. K.; SAGIAS, N. C.; MATHIOPOULOS, P. T. N<sup>\*</sup>nakagami: A novel stochastic model for cascaded fading channels. **IEEE Transactions on Communications**, v. 55, n. 8, p. 1453–1458, Ago 2007. ISSN 0090-6778.

KHAFAGY, M.; ISMAIL, A.; ALOUINI, M. S.; AISSA, S. On the outage performance of full-duplex selective decode-and-forward relaying. **IEEE Communications Letters**, v. 17, n. 6, p. 1180–1183, Junho 2013. ISSN 1089-7798.

KHAN, F. A.; TOURKI, K.; ALOUINI, M. S.; QARAQE, K. A. Outage and ser performance of spectrum sharing system with tas/mrc. In: **2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)**. Budapeste, Hungria, 2013. p. 381–385. ISSN 2164-7038.

KIM, S.; VYAS, R.; BITO, J.; NIOTAKI, K.; COLLADO, A.; GEORGIADIS, A.; TENTZERIS, M. M. Ambient rf energy-harvesting technologies for self-sustainable standalone wireless sensor platforms. **Proceedings of the IEEE**, v. 102, n. 11, p. 1649–1666, Nov 2014. ISSN 0018-9219.

KRIKIDIS, I.; TIMOTHEOU, S.; SASAKI, S. Rf energy transfer for cooperative networks: Data relaying or energy harvesting. **IEEE Communications Letters**, v. 16, n. 11, p. 1772–1775, Novembro 2012. ISSN 1089-7798.

KWON, T.; LIM, S.; CHOI, S.; HONG, D. Optimal duplex mode for df relay in terms of the outage probability. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 59, n. 7, p. 3628–3634, Set 2010. ISSN 0018-9545.

LANEMAN, J. N.; TSE, D. N. C.; WORNELL, G. W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 50, n. 12, p. 3062–3080, Dez 2004. ISSN 0018-9448.

LEE, T.; MAYARAM, K.; FIEZ, T. S. Efficient far-field radio frequency power conversion system for passively powered sensor networks. In: **IEEE Custom Integrated Circuits Conference 2006**. San Jose, CA, USA, 2006. p. 293–296. ISSN 0886-5930.

LEE, J.; WANG, H.; ANDREWS, J. G.; HONG, D. Outage probability of cognitive relay networks with interference constraints. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 10, n. 2, p. 390–395, Fevereiro 2011. ISSN 1536-1276.

LEE, K.; YENER, A. Cth17-4: Outage performance of cognitive wireless relay networks. In: **IEEE Globecom 2006**. 2006. p. 1–5. ISSN 1930-529X.

LEE, S.; ZHANG, R.; HUANG, K. Opportunistic wireless energy harvesting in cognitive radio networks. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 12, n. 9, p. 4788–4799, Setembro 2013. ISSN 1536-1276.

LIU, J.; XIONG, K.; FAN, P.; ZHONG, Z. Rf energy harvesting wireless powered sensor networks for smart cities. **IEEE Access**, v. 5, p. 9348–9358, 2017. ISSN 2169-3536.

LIU, Y.; MOUSAVIFAR, S. A.; DENG, Y.; LEUNG, C.; ELKASHLAN, M. Wireless energy harvesting in a cognitive relay network. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 15, n. 4, p. 2498–2508, Abril 2016. ISSN 1536-1276.

LU, X.; WANG, P.; NIYATO, D.; HOSSAIN, E. Dynamic spectrum access in cognitive radio networks with rf energy harvesting. **IEEE Wireless Communications**, v. 21, n. 3, p. 102–110, Junho 2014. ISSN 1536-1284.

LUO, S.; ZHANG, R.; LIM, T. J. Optimal save-then-transmit protocol for energy harvesting wireless transmitters. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 12, n. 3, p. 1196–1207, Março 2013. ISSN 1536-1276.

MAFRA, S. B.; ALVES, H.; COSTA, D. B.; SOUZA, R. D.; FERNANDEZ, E. M. G.; LATVA-AHO, M. On the performance of cognitive full-duplex relaying under spectrum sharing constraints. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, v. 2015, n. 1, p. 1–13, 2015. ISSN 1687-1499.

MAFRA, S. B.; FERNÁNDEZ, E. M. G.; MONTEJO-SÁNCHEZ, S.; PEREIRA, H. D. Performance analysis of energy constrained cognitive full-duplex generalized network coding scheme. **XXXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS (SBrT)**, São Pedro, Brasil, Setembro 2017.

MEN, J.; GE, J.; ZHANG, C. A joint relay-and-antenna selection scheme in energy-harvesting mimo relay networks. **IEEE Signal Processing Letters**, v. 23, n. 4, p. 532–536, Abril 2016. ISSN 1070-9908.

MITOLA, J.; MAGUIRE, G. Q. Cognitive radio: making software radios more personal. **IEEE Personal Communications**, v. 6, n. 4, p. 13–18, Ago 1999. ISSN 1070-9916.

MORITZ, G. L.; MAFRA, S. B.; REBELATTO, J. L.; SOUZA, R. D.; UCHÃ'A-FILHO, B. F.; LI, Y. Network-coded secondary communication with opportunistic energy harvesting. In: **2015 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)**. Bruxelas, Bélgica, 2015. p. 336–340.

NASIR, A. A.; ZHOU, X.; DURRANI, S.; KENNEDY, R. A. Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 12, n. 7, p. 3622–3636, Julho 2013. ISSN 1536-1276.

NOSRATINIA, A.; HUNTER, T. E.; HEDAYAT, A. Cooperative communication in wireless networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 42, n. 10, p. 74–80, Out 2004. ISSN 0163-6804.

Papoulis, A.; Pillai, S. U. **Probability, Random Variables, and Stochastic Processes**. 4. ed. McGraw-Hill Higher Education, 2002.

PEREIRA, H. D.; MAFRA, S. B.; FERNÁNDEZ, E. M. G. Análise de desempenho de uma rede cognitiva full-duplex com captação de energia. **XXXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS (SBrT)**, São Pedro, Brasil, Setembro 2017.

RIIHONEN, T.; WERNER, S.; WICHMAN, R. Hybrid full-duplex/half-duplex relaying with transmit power adaptation. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 10, n. 9, p. 3074–3085, Setembro 2011. ISSN 1536-1276.

RIIHONEN, T.; WERNER, S.; WICHMAN, R. Mitigation of loopback self-interference in full-duplex mimo relays. **IEEE Transactions on Signal Processing**, v. 59, n. 12, p. 5983–5993, Dez 2011. ISSN 1053-587X.

SABHARWAL, A.; SCHNITER, P.; GUO, D.; BLISS, D. W.; RANGARAJAN, S.; WICHMAN, R. In-band full-duplex wireless: Challenges and opportunities. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 32, n. 9, p. 1637–1652, Set 2014. ISSN 0733-8716.

SAMPLE, A. P.; PARKS, A. N.; SOUTHWOOD, S.; SMITH, J. R. Wireless ambient radio power. In: **Wirelessly Powered Sensor Networks and Computational RFID**. New York, NY: Springer New York, 2013. p. 223–234. ISBN 978-1-4419-6166-2.

STOOPMAN, M.; KEYROUZ, S.; VISSER, H. J.; PHILIPS, K.; SERDIJN, W. A. A self-calibrating rf energy harvester generating 1v at  $-26.3$  dbm. In: **2013 Symposium on VLSI Circuits**. Kioto, Japão, 2013. p. C226–C227. ISSN 2158-5601.

STOOPMAN, M.; KEYROUZ, S.; VISSER, H. J.; PHILIPS, K.; SERDIJN, W. A. Co-design of a cmos rectifier and small loop antenna for highly sensitive rf energy harvesters. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, v. 49, n. 3, p. 622–634, Março 2014. ISSN 0018-9200.

SUDEVALAYAM, S.; KULKARNI, P. Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 13, n. 3, p. 443–461, Março 2011. ISSN 1553-877X.

THOEN, S.; PERRE, L. V. der; GYSELINCKX, B.; ENGELS, M. Performance analysis of combined transmit-sc/receive-mrc. **IEEE Transactions on Communications**, v. 49, n. 1, p. 5–8, Jan 2001. ISSN 0090-6778.

VARSHNEY, L. R. Transporting information and energy simultaneously. In: **2008 IEEE International Symposium on Information Theory**. 2008. p. 1612–1616. ISSN 2157-8095.

VISSER, H. J.; VULLERS, R. J. M. Rf energy harvesting and transport for wireless sensor network applications: Principles and requirements. **Proceedings of the IEEE**, v. 101, n. 6, p. 1410–1423, Junho 2013. ISSN 0018-9219.

VYAS, R.; NISHIMOTO, H.; TENTZERIS, M.; KAWAHARA, Y.; ASAMI, T. A battery-less, energy harvesting device for long range scavenging of wireless power from terrestrial tv broadcasts. In: **2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest**. Montreal, Canadá, 2012. p. 1–3. ISSN 0149-645X.

VYAS, R. J.; COOK, B. B.; KAWAHARA, Y.; TENTZERIS, M. M. E-wehp: A battery-less embedded sensor-platform wirelessly powered from ambient digital-tv signals. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 61, n. 6, p. 2491–2505, June 2013. ISSN 0018-9480.

WANG, Z.; CHEN, Z.; XIA, B.; LUO, L.; ZHOU, J. Cognitive relay networks with energy harvesting and information transfer: Design, analysis, and optimization. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 15, n. 4, p. 2562–2576, Abril 2016. ISSN 1536-1276.

YEOH, P. L.; ELKASHLAN, M.; KIM, K. J.; DUONG, T. Q.; KARAGIANNIDIS, G. K. Transmit antenna selection in cognitive mimo relaying with multiple primary transceivers. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 65, n. 1, p. 483–489, Jan 2016. ISSN 0018-9545.

ZHANG, R.; HO, C. K. Mimo broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 12, n. 5, p. 1989–2001, May 2013. ISSN 1536-1276.

ZHONG, B.; ZHANG, Z.; CHAI, X.; PAN, Z.; LONG, K.; CAO, H. Performance analysis for opportunistic full-duplex relay selection in underlay cognitive networks. **IEEE**

**Transactions on Vehicular Technology**, v. 64, n. 10, p. 4905–4910, Out 2015. ISSN 0018-9545.

ZHOU, X.; ZHANG, R.; HO, C. K. Wireless information and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff. In: **2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)**. Anaheim, CA, USA, 2012. p. 3982–3987. ISSN 1930-529X.

ZHOU, X.; ZHANG, R.; HO, C. K. Wireless information and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff. **IEEE Transactions on Communications**, v. 61, n. 11, p. 4754–4767, Novembro 2013. ISSN 0090-6778.

ZUNGERU, A. M.; ANG, L.; PRABAHARAN, S. R. S.; SENG, K. P. Radio frequency energy harvesting and management for wireless sensor networks. In: **Green Mobile Devices and Networks: Energy Optimization and Scavenging Techniques**. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Inc., 2012. abs/1208.4439. ISBN 1439859892, 9781439859896.